

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Старовойта Ярослава Івановича**

УДК 681.8

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

Теоретичні основи проектування кругових антенних решіток, утворених із  
циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів і екрану  
05.09.08 – Прикладна акустика та звукотехніка

Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів  
і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

---

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Лейко Олександр Григорович, д.т.н., проф.

## **АНОТАЦІЯ**

**Старовойт Я.І. Теоретичні основи проектування кругових антенних решіток, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів і екрану**  
- На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.08 - прикладна акустика та звукотехніка. - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена розробці теоретичних засад проектування та розрахунку кругових циліндричних гідроакустичних антенних решіток, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів в постановці задач стаціонарної гідроелектропружності та математичної фізики відносно випромінювання ними гідроакустичних сигналів з урахуванням взаємодії електричних, механічних та акустичних полів та практичній реалізації цих засад. Розроблені методи дозволяють системно врахувати вплив конструктивних характеристик решіток та перетворювачів у їх складі на їх фізичні поля, які взаємодіють між собою при випромінюванні сигналів.

Автором проведено аналіз конструктивних особливостей побудови кругових антен, що складаються з циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів. До них належать, в частині випромінювачів – склад п'єзокерамічного матеріалу, з якого виготовлено активні елементи випромінювачів, тип використаної поляризації та характер її організації, тип конструктивного виконання випромінювача та тип заповнення внутрішнього середовища випромінювача, а в частині антенної решітки – розміри акустичного екрана, відстань між елементами в решітці, кількість елементів в решітці та режим роботи решітки (круговий або секторний). Розглянуто фізичні моделі кругової антенної решітки та випромінювачів, що входять до її складу. Відповідно до розглянутих конструкцій розроблена розрахункова модель кругової антенної решітки та вибрано методи розв'язку задач визначення фізичних полів, які приймають участь в процесі роботи антени.

На основі розроблених моделей з використанням методу зв'язаних полів в багатозв'язних областях шляхом розв'язку наскрізних задач випромінювання гідроакустичних сигналів круговими антенними решітками, утвореними із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів, автором одержані аналітичні співвідношення для опису електричних, механічних та акустичних полів решіток та їх перетворювачів силової та компенсованої конструкцій. В частині акустичних полів: розподіл амплітуд звукових тисків в ближній зоні антенної решітки; характеристики спрямованості антенних решіток та інші параметри, які дозволяють оцінити технічні характеристики антени, що проектується. В частині механічних полів: частотні та кутові залежності амплітуд та фаз коливальної швидкості для кожного випромінювача решітки та мод їх коливань. В частині електричних полів: залежності від частоти збуджуючого електричного струму та вхідних електричних опорів перетворювачів.

Особлива увага приділена врахуванню взаємодії цих полів в процесі перетворення антенною решіткою електричної енергії в механічну та з механічної в акустичну, взаємодії випромінювачів в решітці між собою та між випромінювачами і екраном по акустичному полю, реакції зовнішнього та внутрішніх середовищ випромінювачів на збудження в них акустичних полів та залежність всіх перерахованих факторів від конкретних геометричних, фізичних та хвильових властивостей конструкцій решіток та випромінювачів у їх складі, а саме: в частині антенних решіток - кількість випромінювачів у складі решітки та відстані між ними; режими роботи решітки; розміри акустичного екрану; в частині циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів - тип конструктивного виконання, тип внутрішнього заповнення, тип п'єзокерамічного матеріалу та тип його поляризації.

Для кругових антенних решіток та циліндричних випромінювачів у їх складі проведено чисельні експерименти та виконано системні дослідження властивостей електричних, механічних та акустичних полів та зв'язку між ними. Встановлено якісні і кількісні закономірності впливу на фізичні поля геометричних, фізичних та хвильових характеристик елементів конструкцій кругових антенних решіток.

Проведено аналіз отриманих в ході роботи результатів чисельних експериментів та проведена їх фізична інтерпретація.

Автором було проведено експериментальні дослідження. Співставлення отриманих експериментальним шляхом результатів з розрахованими дозволяє зробити висновок, що розроблене в роботі розрахункове забезпечення проектування кругових антенних решіток, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів, відповідає реаліям досліджуваних антен.

Встановлено та досліджено ряд нових фізичних властивостей кругових антенних решіток, обумовлених взаємодією як фізичних полів різної природи, так і взаємодією випромінювачів у складі решітки за акустичним полем.

Виявлена суттєва зміна механічних полів циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів при роботі їх у складі кругової антенної решітки, порівняно з одиночним випромінювачем, в частині появи в них окрім нульової, наступних мод коливань і ефективного перерозподілу між ними енергії, яка «закачується» в випромінювачі решітки на нульовій моді коливань. Це обумовлено взаємодією випромінювачів між собою при роботі у складі антенної решітки, внаслідок якої при радіальній симетрії електричного навантаження відбувається порушення радіальної симетрії радіаційного навантаження випромінювачів. Це порушення зумовлено наявністю в ближньому полі випромінювача інших працюючих випромінювачів та акустичного екрану, розміщеного в центрі антени, через це виникає взаємодія між ними по акустичному полі, яка обумовлена багатократним обміном випромінювачами в антенній решітці випромінюваними та розсіяними (відбитими) хвилями.

Виявлено розширення спектру власних резонансних частот акустичних полів антенних решіток, обумовлене виникненням в механічних полях циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів мод коливань, наступних за нульовою, які, в свою чергу, виникають внаслідок порушення радіальної симетрії радіаційного навантаження випромінювача.

Встановлено закономірності формування електричних полів випромінювачів у складі антенних решіток. До них належать залежність керування електричними



струмами випромінювачів антенних решіток в їх зовнішніх ланцюгах від області робочих частот та зміна і умови змін характеристик поведінки активних та реактивних складових електричних опорів випромінювачів у складі решіток в частотних областях.

Визначено умови, при яких можливо отримати ефективне випромінення гідроакустичних сигналів на частотах набагато нижчих від власних резонансних частот оболонок циліндричних випромінювачів.

Створені можливості при виконанні проектних робіт по круговим антенним решіткам здійснювати пошук найбільш раціональних шляхів їх побудови завдяки виконанню розрахунків кількісних значень параметрів електричних, механічних та акустичних полів випромінювачів решіток в залежності від їх конкретних конструкційних характеристик.

Отримані автором результати дозволяють виконувати розрахунки кількісних значень параметрів механічних, акустичних та електричних полів кругових антенних решіток, утворених із циліндричних випромінювачів та м'якого акустичного екрану в залежності від параметрів та характеристик конкретних елементів виконання їх конструкцій.

Це в свою чергу дозволяє виконувати кількісні оцінки номіналів електричних елементів в еквівалентних електричних схемах заміщення п'єзокерамічних випромінювачів при проведенні проектних робіт по узгодженню електричних генераторів з випромінювачами в трактах гідроакустичної апаратури.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в Державному підприємстві «Київський науково-дослідний інститут гідроприладів» при виконанні розрахунків звукових полів циліндричних випромінювачів по контракту та розрахунків звукових полів антенних решіток судових станцій та в навчальному процесі НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Ключові слова: гідроакустична антена, кругова антенна решітка, акустичний екран, фізичні поля, випромінювання гідроакустичних сигналів, циліндричний п'єзокерамічний випромінювач, конструктивні особливості.

## SUMMARY

**Starovoit Y.I. Theoretical basis for the design of the circular sonar arrays formed from cylindrical piezoceramic radiators and the acoustic baffle. On the rights of the manuscript.**

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences on the specialty 05.09.08 - Applied acoustics and sound engineering. - National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the development of theoretical principles for the design and calculation of circular cylindrical hydroacoustic sonar arrays formed from cylindrical piezoceramic radiators in the formulation of stationary hydroelectroplastic and mathematical physics problems with respect to the radiation of their hydroacoustic signals, taking into account the interaction of electric, mechanical and acoustic fields, and the practical realization of these principles. The developed methods allow systematically to take into account the influence of the structural characteristics of the lattices and transducers in their composition on their physical fields, which interact with each other at the emission of signals.

The author analyzes the design features of the construction of circular antennas consisting of cylindrical piezoceramic emitters. These include, in the part of radiators, the composition of the piezoceramic material from which the active elements of the radiators were made, the type of polarization used and the nature of its organization, the type of constructive implementation of the emitter and the type of filling of the internal environment of the emitter, and in the part of the antenna array, the size of the acoustic screen, the distance between the elements in the grid, the number of elements in the grid and the lattice mode (circular or sector). The physical models of the circular antenna array and radiators that are part of it are considered. In accordance with the considered designs, the design model of the circular antenna array was developed and methods for solving the problems of determining the physical fields that participate in the process of the antenna are selected.

On the basis of developed models using the method of bound fields in multicomponent regions by solving transverse problems of radiation of hydroacoustic signals by circular antenna arrays formed from cylindrical piezoceramic emitters, the author obtained analytical relations for the description of electric, mechanical and acoustic fields of lattices and their converters of power and compensated structures. In the part of the acoustic fields: the distribution of amplitudes of sound pressure in the near-range antenna array; the characteristics of the antenna array direction and other parameters that allow us to assess the technical characteristics of the projected antenna. In the field of mechanical fields: frequency and angle dependences of amplitudes and phases of oscillation velocity for each lattice emitter and modes of their oscillations. In the part of electric fields: Depending on the frequency of the exciting electric current and the input electrical resistance of the converters.

Particular attention is paid to the consideration of the interaction of these fields in the process of transforming the antenna into a grid of electric energy in a mechanical and mechanical to acoustic, interaction of emitters in a grid between themselves and between emitters and the screen by the acoustic field, the reaction of the external and internal environments of the radiators to the excitation of acoustic fields in them, and the dependence of all of these factors on the specific geometric, physical and wave properties of lattice and radiator structures in their composition, namely: in the part of antenna re niches - the number of radiators in the lattice and the distance between them; lattice modes; acoustic screen dimensions; in the part of cylindrical piezoceramic emitters - the type of design, the type of internal filling, the type of piezoceramic material and the type of its polarization.

Numerical experiments were carried out for circular antenna arrays and cylindrical emitters in their composition and systematic studies of the properties of electric, mechanical and acoustic fields and their connection between them were performed. Qualitative and quantitative laws of influence of physical fields of geometric, physical and wave characteristics of elements of structures of circular antenna arrays are established. An analysis of the results of numerical experiments obtained during the work was carried out and their physical interpretation was carried out.

The author carried out experimental studies. The comparison of the results obtained experimentally with the calculated ones allows us to conclude that the design support for the design of circular antenna arrays formed from cylindrical piezoceramic radiators developed in the work corresponds to the realities of the studied antennas.

A number of new physical properties of circular antenna arrays due to the interaction of both physical fields of different nature and the interaction of emitters in the lattice behind the acoustic field are established and investigated.

A significant change in the mechanical fields of cylindrical piezoceramic radiators during their operation in the composition of the circular antenna array, compared with a single emitter, was found in the part of the occurrence of, in addition to zero, the following modes of oscillation in them and the effective redistribution of energy between them, which is "pumped" into the radiator of the lattice on zero mode of oscillation. This is due to the interaction of the emitters with each other when working in the antenna array, which results in radial symmetry of the radiative load of the emitters in the radial symmetry of the electric load. This breakdown is due to the presence of other emitters operating in the near field of the emitter and the acoustic screen located in the antenna center, resulting in an interaction between them in the acoustic field due to the multiple exchange of emitters in the antennae of the grid emitting and scattered (reflected) waves.

The expansion of the spectrum of the resonance frequencies of the acoustic fields of the antenna arrays has been revealed due to the emergence in the mechanical fields of cylindrical piezoceramic emitters of vibration modes following zero, which, in turn, arise due to violation of the radial symmetry of the radiation load of the emitter.

The regularities of formation of electric fields of radiators in the structure of antenna arrays are established. These include the dependence of the control of electric currents of antenna array radiators in their external circuits on the region of operating frequencies and the change and conditions of changes in the behavior of the behavior of the active and reactive components of the electrical resistance of the emitters in the lattice in the frequency regions.

The conditions under which it is possible to obtain effective radiation of hydroacoustic signals at frequencies much lower than their own resonant frequencies of shells of cylindrical emitters is determined.

Possibilities for carrying out design work on circular antenna arrays are made to search for the most rational ways of their construction by performing calculations of the quantitative values of the parameters of electric, mechanical and acoustic fields of radiator radiators depending on their specific structural characteristics.

The results obtained by the author allow to carry out calculations of quantitative values of parameters of mechanical, acoustic and electric fields of circular antenna arrays formed from cylindrical radiators and soft acoustic screen depending on the parameters and characteristics of concrete elements of their designs.

This, in turn, allows us to carry out quantitative assessments of the nominal values of electrical elements in equivalent electrical schemes for the replacement of piezoceramic radiators when carrying out design work for the coordination of electric generators with emitters in the paths of hydroacoustic equipment.

The results of the dissertation work were introduced at the State Enterprise "Kyiv Scientific Research Institute of Hydraulic Devices" when performing sound field calculations of cylindrical emitters under the contract and calculations of sound fields of antenna arrays of court stations and in the educational process of NTUU "KPI im. Igor Sikorsky".

**Key words:** hydroacoustic antenna, circular antenna array, acoustic screen, physical fields, radiation of hydroacoustic signals, cylindrical piezoceramic emitter, structural features.

#### **Список публікацій:**

1. Лейко А. Г., Нижник А. И., Старовойт Я. И. Звуковые поля пьезокерамических излучателей с различным пьезоэффектом. *Электроника и связь*. 2013. № 5. С. 50–55. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів акустичних полів випромінювачів та їх аналізі (Index Copernicus).*
2. Лейко А. Г., Нижник А. И., Старовойт Я. И. Акустические свойства

цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкции с продольным и поперечным пьезоэффектом. *Электроника и связь*. 2013. № 6. С. 62–73. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів акустичних полів перетворювачів та їх аналізі (Index Copernicus)*.

3. Лейко А. Г., Нижник А. И., Старовойт Я. И. К вопросу об излучении звука цилиндрическими пьезокерамическими преобразователями различной конструкции. *Электроника и связь*. 2014. № 1. С. 81–94. *Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі (Index Copernicus)*.
4. Лейко А.Г., Нижник А.И., Гладких Н.Д., Старовойт Я.И. Электрические свойства цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкции с окружной поляризацией. *Электроника и связь*. 2014. № 3. С. 62–72. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів електричних полів антени та їх аналізі (Index Copernicus)*.
5. Лейко А.Г., Старовойт Я.И. Физические поля круговых цилиндрических гидроакустических антенн с экраном и цилиндрическими пьезокерамическими излучателями. *Электроника и связь*. 2015. № 3. С. 94–100. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів акустичних полів перетворювачів та їх аналізі (Index Copernicus)*.
6. Лейко А.Г., Старовойт Я.И. Механічні поля циліндричного п'єзокерамічного випромінювача силової конструкції в присутності акустичного екрана. *Электроника и связь*. 2017. № 6. С. 48–55. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів акустичних полів перетворювачів та їх аналізі (Index Copernicus)*.
7. Лейко А. Г., Старовойт Я.И. Частотные свойства электрических полей цилиндрических пьезокерамических излучателей с экраном во внутренней полости. *Журнал нано- та електронної фізики*. 2016. т. 8, № 4. С. 04018-1–04018-6. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні*

*розрахунків параметрів акустичних полів перетворювачів та їх аналізі (Scopus)*

8. Лейко А., Петрищев О., Старовойт Я., Богданова Н. Соотношения электроупругости для расчета параметров эллиптических цилиндрических пьезокерамических преобразователей. *Болгарско списание за инженерно проектирование*. 2017. №1. С. 50–63. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів акустичних полів перетворювачів та їх аналізі (Index Copernicus).*
9. Leiko, O., Derepa, A., Pozdniakova, O. and Starovoit, Y. Acoustic fields of circular cylindrical hydroacoustic systems with a screen formed from cylindrical piezoceramic radiators. *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*. 2018. № 15. P. 41–46. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів акустичних полів перетворювачів (Scopus)*
10. Циліндричний гідроакустичний перетворювач: пат. 99064 Україна: МПК G01S 7/52(2006.01). № 201500253; заявл. 14.01.15; опубл. 12.05.15, Бюл. № 9. 6 с. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні патентних досліджень та розробці опису винаходу.*
11. Направлений циліндричний гідроакустичний перетворювач: пат. 99634 Україна: МПК G01S 7/52(2006.01). № 201500697; заявл. 28.01.15; опубл. 10.06.15, Бюл. № 11. 6 с. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні патентних досліджень та розробці опису винаходу.*
12. Активно-пасивна система «Гідроакустична станція – надводний корабель»: пат. 100428 Україна: МПК G01S 7/52(2006.01). № 201500944; заявл. 06.02.15; опубл. 27.07.15, Бюл. № 14. 7 с. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні патентних досліджень та розробці опису винаходу*
13. Старовойт Я.І. К вопросу об излучении звука цилиндрическим пьезокерамическим преобразователем. VI міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «ЕЛЕКТРОНІКА-2013»: збірник стататей, м.Київ, 29 – 30 квітня 2013 року. Київ, 2013. С.85–89.
14. Старовойт Я.І. Физические поля круговых цилиндрических гидроакустических

антенн с экраном и цилиндрическими пьезокерамическими излучателями с радиальной поляризацией. Акустичний симпозіум «Консонанс-2015»: збірник праць, м. Київ, 29 – 30 вересня 2015 року. Київ, 2015. С. 194–199.

15. Нижник О. І., Гладкіх Н. Д., Маслов Д. С., Гусак З. Т., Старовойт Я. І., Святненко А. О. Станція пошуку плавців-диверсантів. Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки: тези доповідей на VI науково-технічній конференції, м. Київ 15–18 грудня 2015 року. Київ, 2015. С. 406–407.  
*Внесок здобувача полягає в проведенні математичного моделювання.*
16. Старовойт Я.І. Механические поля цилиндрического пьезокерамического излучателя компенсированной конструкции в присутствии цилиндрического акустического экрана. IX міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «ЕЛЕКТРОНІКА-2016»: збірник статей, м. Київ, 13–15 квітня 2016 року. Київ, 2016. С. 95–99
17. Старовойт Я.І. О возможных путях повышения эффективности цилиндрических антенн с экраном, Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки. IV Міжнародна науково-практична конференція: тези доповідей, м. Київ, 12–13 жовтня 2016 року. Київ, 2016. С. 345–347



<b>Вступ.....</b>	<b>15</b>
<b>1 Теоретичні основи розрахунків фізичних полів кругових циліндричних гідроакустичних антен з екранами, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів.....</b>	<b>21</b>
1.1 Конструктивні особливості кругових циліндричних гідроакустичних антен з екранами, які необхідно враховувати при визначенні фізичних полів антен.....	21
1.2 Відображення особливостей конструкцій кругових гідроакустичних антен з екранами в розрахункових моделях. Вибір методу вирішення задачі випромінювання.....	25
1.3 Вирішення задачі визначення фізичних полів кругових антен з акустично м'яким екраном, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів силової та компенсованої конструкцій з окружною поляризацією.....	34
1.4 Вирішення задачі визначення фізичних полів кругових гідроакустичних антен з акустично м'яким екраном, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів силової та компенсованої конструкцій з радіальною поляризацією.....	38
Висновки до розділу 1.....	41
<b>2 Властивості механічних полів кругових гідроакустичних антен з екранами в залежності від особливостей конструктивного виконання антен та їх елементів.....</b>	<b>41</b>
2.1 Параметри досліджуванних механічних полів.....	41
2.2 Властивості механічних полів кругових антен з екраном, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів силової конструкції.....	46
2.3 Властивості механічних полів кругових антен з екраном, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів компенсованої конструкції.....	65
2.4 Властивості механічних полів кругових антен в залежності від складу застосованої в конструкції випромінювачів п'єзокераміки та її поляризації.....	80
2.5 Властивості механічних полів кругових антен в залежності від конструктивних розмірів антен, екранів та випромінювачів.....	91
Висновки по розділу 2.....	110
<b>3 Властивості акустичних полів кругових гідроакустичних антен з екраном в залежності від особливостей конструктивного виконання антен та їх елементів.....</b>	<b>110</b>
3.1 Параметри акустичних полів, що досліджуються.....	110
3.2 Властивості акустичних полів кругових циліндричних антен з екраном, утворених із циліндричних п'єзокерамічних	

випромінювачів силової конструкції.....	114
3.3 Властивості акустичних полів кругових циліндричних антен з екраном, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів компенсованої конструкції.....	128
3.4 Властивості акустичних полів кругових циліндричних антен з екраном в залежності від складу застосованої в конструкції випромінювачів п'єзокераміки та її поляризації.....	143
3.5 Властивості акустичних полів кругових циліндричних антен з екраном в залежності від розмірів антен, екранів та випромінювачів...	153
3.6 Експериментальні дослідження акустичних полів кругових циліндричних антен з екраном, що утворені із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів.....	173
Висновки по розділу 3.....	175
<b>4 Властивості електричних полів кругових циліндричних г/а антен з екраном в залежності від особливостей конструктивного виконання антен та їх елементів.....</b>	<b>176</b>
4.1 Параметри електричних полів, що досліджуються.....	176
4.2 Властивості електричних полів кругових циліндричних гідроакустичних антен з екраном, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів силової конструкції.....	182
4.3 Властивості електричних полів кругових циліндричних гідроакустичних антен з екраном, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів компенсованої конструкції.....	192
4.4 Властивості електричних полів кругових циліндричних гідроакустичних антен з екраном в залежності від складу застосованої в конструкції випромінювача п'єзокераміки та її поляризації.....	203
4.5 Властивості електричних полів кругових циліндричних гідроакустичних антен з екраном в залежності від конструктивних розмірів антен, екранів та випромінювачів.....	216
Висновки по розділу 4.....	223
<b>Висновки.....</b>	<b>225</b>
<b>Список використаних джерел.....</b>	<b>227</b>

## ВСТУП

**Обґрунтування теми дослідження.** Кругові циліндричні гідроакустичні антени знайшли широке застосування при побудові корабельних та авіаційних гідроакустичних станцій. Зазвичай вони утворюються із гідроакустичних перетворювачів, які розміщені по циліндричній поверхні, та циліндричного акустичного екрану у внутрішній порожнині цієї поверхні. Найбільш широке застосування в таких антенах знайшли циліндричні п'єзокерамічні перетворювачі і акустично м'які екрани. На відміну від радіотехнічних антен гідроакустичні антени виконують дві функції – функцію перетворення одного виду енергії в інший і функцію формування акустичної енергії в оточуючому середовищі. Кожна з цих функцій має свої фізичні особливості.

Функція перетворення енергії в п'єзокерамічних перетворювачах базується на зв'язаності між собою трьох типів полів, що приймають участь в цьому процесі – електричного, механічного і акустичного.

Для функції формування акустичного поля характерним є обмін звуковими хвилями, випроміненими і відбитими всіма елементами, що утворюють антену. Оскільки при цьому під дією цієї акустичної взаємодії змінюються і акустичні поля випромінювачів у складі антени, то обидві названі функції гідроакустичних антен стають теж залежними між собою.

Складність математичного опису цих функцій змусила при розробці аналітичної бази для проектування антен розділити ці функції і розглядати їх незалежно одна від одної. Зв'язок між ними забезпечувався заданням нормальної складової коливальної швидкості на поверхнях перетворювачів в режимі випромінення звуку антеною. Для функції перетворення енергії гідроакустичними антенами значний внесок в розвиток теорії зробили такі вчені як Улітко А.Ф., Грінченко В.Т., Гузь О.М., Аронов Б.С., Петріщев О.М., Старов Л.С., Кубенко В.Д. та інші.

Підходи до аналітичного опису функції формування акустичної енергії гідроакустичними антенами розвивали в своїх роботах Грінченко В.Т., Вовк І.В., Карновський М.І., Лейко О.Г., Маципура В.Т., Шендеров Є.Л. та інші.

Але при наведеному вище підході задання коливальної швидкості перетворювачів ідеалізує джерела звуку, оскільки в цьому випадку їх коливальна швидкість не залежить від реакції оточуючого середовища. В реальних антенах коливальна швидкість перетворювачів має кінцеві значення у кожного із них і залежить як від внутрішнього механічного опору, так і від реакції оточуючих середовищ. Завдяки цьому параметри реальних антен відрізняються від розрахованих розділеними підходами.

Виходом із наведеної ситуації є розробка таких аналітичних підходів проектування гідроакустичних антен, які дозволяли б враховувати взаємну залежність фізичних полів при перетворенні енергії, акустичну взаємодію між собою елементів гідроакустичних антен при формуванні акустичних полів і вплив процесів формування акустичних полів на процеси перетворення енергії в перетворювачах антен. Розробці таких підходів присвячені роботи Грінченка В.Т., Гузя О.М., Вовка І.В., Дерепи А.В., Коржика А.В., Кубенка В.Д., Лейка О.Г., МАципури В.Т., Петріщева О.М., Улітко А.Ф., Aronov B., Ebenezer D. Та інші. В той же час розробка аналітичного забезпечення проектування кругових циліндричних антен з екраном з урахуванням всіх наведених вище взаємодій різних фізичних полів випала із поля зору дослідників. А оскільки названі гідроакустичні антени є основою сучасних гідроакустичних станцій різного призначення, то створення названого аналітичного забезпечення являє собою актуальну задачу для практичної гідроакустики.

**Зв'язок роботи з науковими планами, програмами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі акустики та акустoeлектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках держбюджетної НДР “Розробка неінвазивної пасивної акустичної системи нового покоління для вимірювання критичних фізіологічних параметрів головного мозку та внутрішнього вуха людини” (номер державної реєстрації - № 0118U003533)

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є створення аналітичного забезпечення для виконання проектних робіт по круговим циліндричним

гідроакустичним антенним решіткам, які утворені із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів та циліндричного акустично м'якого екрану, з урахуванням взаємодії фізичних полів при перетворенні енергії і формуванні її в оточуючому середовищі та взаємодії процесів перетворення і формування енергії між собою.

Досягнення сформульованої мети можливо здійснити шляхом розв'язання наступних завдань:

1. Розробка розрахункових моделей кругових циліндричних антенних решіток з екранами і циліндричними п'єзокерамічними випромінювачами, які дозволяють врахувати при випроміненні звуку взаємодію всіх задіяних фізичних полів і особливості виконання конструкцій антен.

2. Розвиток на основі методу зв'язаних полів в багатозв'язних областях нових підходів до розв'язку «наскрізних» задач випромінення звуку круговими антенними решітками з екраном і циліндричними п'єзокерамічними випромінювачами і одержання на їх основі розрахункових співвідношень для проектування антен, в яких враховані зв'язаності всіх задіяних полів.

3. Систематизовані чисельні дослідження на основі одержаних співвідношень властивостей електричних механічних та акустичних полів кругових антенних решіток і встановлення закономірностей їх змін в залежності від конструктивного виконання антени.

4. Експериментальні дослідження кругових антенних решіток з екраном для підтвердження адекватності запропонованих розрахункових моделей і реальних антен.

5. Фізичне осмислення встановлених закономірностей і розробка на його основі практичних рекомендацій по проектуванню кругових циліндричних гідроакустичних антенних решіток з екраном, які утворені із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів.

**Об'єкт дослідження** – процеси взаємодії фізичних полів кругових антенних решіток з екраном при перетворенні енергії і її формуванні в оточуючому середовищі.

**Предмет дослідження** – кругові антенні решітки, які утворені із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів і екрану.

**Методи дослідження.** Дослідження виконані із застосуванням ряду методів постановки і розв'язання задач стаціонарної гідроелектропружності. Так наскрізні задачі випромінення звуку круговими антенними решітками, які утворені із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів і акустичного екрану, розв'язані методом зв'язаних полів в багатозв'язних областях. Для одержання аналітичних співвідношень, що визначають задіяні в процесі випромінення звуку фізичні поля, використані методи часткових областей і переносу систем координат. Чисельні результати одержані з використанням методів розв'язку нескінченних систем лінійних алгебраїчних рівнянь. При експериментальних дослідженнях застосовані методи вимірювання акустичних полів в заглушених гідроакустичних басейнах.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше запропоновані нові розрахункові моделі кругових циліндричних гідроакустичних антенних решіток з екраном, які дозволяють при визначенні фізичних полів решіток і їх елементів при випроміненні звуку врахувати їх фізичних полів, так і процесів перетворення енергії і формування її в оточуючому просторі.

2. Розвинуті методи «наскрізного» розв'язку задач випромінення звуку стосовно кругових циліндричних антен з екраном, які утворені із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів, результатом застосування яких є аналітичні співвідношення для визначення фізичних полів, що приймають участь у випроміненні звуку.

3. Для кругових циліндричних антенних решіток з екраном за допомогою систематизованих досліджень з єдиних методичних позицій вперше встановлені властивості зв'язаних між собою електричних, механічних та акустичних полів решіток та їх елементів в залежності від конструкційних, хвильових та фізичних характеристик решіток та випромінювачів.

4. З урахуванням зв'язаності фізичних полів та процесів перетворення енергії і її формування в оточуючих середовищах вперше встановлені для кругових циліндричних антенних решіток з екраном:

– суттєві зміни в механічних полях випромінювачів цих решіток, пов’язані з втратою ними одномодовості цих полів і набуття багатомодовості коливань;

– значне збагачення спектрів власних частот акустичних полів як кругових антенних решіток, так і випромінювачів у їх складі та поширення цього спектру в область низьких частот, значення яких в 5 – 7 разів нижче власних частот п’єзокерамічних оболонок випромінювачів;

– встановлення повної відповідності між закономірностями змін збуджуючих випромінювачі електричних струмів і амплітуд коливальної швидкості нульової моди механічного поля відповідних випромінювачів; визначення умов, при яких окремі випромінювачі кругових антенних решіток в режимах секторного випромінювання акустичної енергії в режимах поглинання її із оточуючого середовища.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблені наукові основи розрахунків при виконанні проектних робіт параметрів акустичних, механічних і електричних полів кругових антенних решіток з екраном в різних режимах випромінювання, що дозволяє забезпечити відповідність параметрів спроектованих антенних решіток заданим технічним вимогам.

2. Встановлені можливості ефективного випромінювання звуку круговими антенними решітками з екраном в області низьких частот на заново генерованих механічних резонансах, частоти яких в 5 – 7 раз нижчі від основної власної частоти п’єзокерамічної оболонки випромінювачів без зміни геометричних розмірів антени.

3. Визначені умови електричного збудження кругових антенних решіток з екраном, при яких в певних діапазонах частот виникає значне погіршення енергетичної ефективності антенних решіток.

4. Результати дисертаційної роботи впроваджені в Державному підприємстві «Київський науково-дослідний інститут гідроапаратури» при виконанні розрахунків звукових полів циліндричних перетворювачів по контракту №15DMAC/YZD589UA від 28.08.2015 р. з КНР, що підтверджується відповідним актом впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** В одержанні наукових та практичних результатів, що викладені в дисертаційній роботі, автору належать постановка та розв’язок

задач, проведення чисельних досліджень, систематизований аналіз результатів та їх фізичне трактування. В патентах [80, 81, 82] здобувач виконав модельні розрахунки та провів аналіз отриманих результатів, виконав патентні дослідження.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі акустики та акустoeлектроніки факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» під керівництвом доктора технічних наук, професора Лейко О.Г.

Робота є результатом самостійних досліджень Старовойта Я.І.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення та результати дисертації обговорювались на:

- Акустичний симпозіум «КОНСОНАНС – 2015», Київ, 29-30.09.2015;
- VI Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2013», Київ, 25-26.04.2013;
- IX Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2016», Київ, 13-15.04.2016;
- VI Міжнародна науково-технічна конференція «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки», Київ, 15-18.12.2015;
- IV Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», Київ, 11-14.10.2016.

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 17 наукових праць, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях (з них 6 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 3 патенти на корисну модель, 5 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та об'єм дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та одного додатку. Загальний обсяг роботи становить 250 сторінок, у тому числі 170 сторінок основного тексту, 96 рисунків та списку використаних джерел із 125 найменувань.



# **РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКІВ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ КОНСТРУКЦІЙ КРУГОВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ГІДРОАКУСТИЧНИХ АНТЕН З ЕКРАНАМИ, УТВОРЕНИХ ІЗ ЦИЛІНДРИЧНИХ П'ЄЗОКЕРАМІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

## **1.1 Конструктивні особливості кругових гідроакустичних антен з екранами, які необхідно враховувати при визначенні фізичних полів антен**

Гідроакустична антенна техніка відноситься до категорії найбільш науко- і технічно ємних напрямів прикладної гідроакустики. Гідроакустична антена є найважливішим структурним елементом будь-якої гідроакустичної системи, багато в чому визначаючи її основні технічні характеристики [6, 19-31], такі як дальність дії, завадостійкість, сектор огляду, характеристику спрямованості і т.п. Стабільність параметрів антени має визначальне значення для забезпечення заданих технічних характеристик гідроакустичних комплексів та систем в процесі їх тривалої експлуатації.

При своїй роботі гідроакустична антена виконує дві основних функції – це перетворення одного виду енергії в інший [6, 30, 32-39] та формування акустичного поля в середовищі [6, 30, 40-47], де вона знаходиться. В процесі перетворення енергії має місце взаємодія трьох типів фізичних полів – електричного, механічного та акустичного. Вона залежить від конструкції антени, конструкції перетворювачів у її складі, параметрів електричного включення перетворювачів у складі антени та характеристик робочого середовища. В процесі формування акустичного поля в оточуючому середовищі також мають місце наступні взаємодії: взаємодія випромінювачів між собою по акустичному полю; взаємодія випромінювачів з акустичним екраном при наявності його в антені; взаємодія випромінювачів з оточуючим середовищем. Ці взаємодії суттєво впливають на вихідні характеристики антени, тому вони мають враховуватися на етапі проектування антени.

Циліндричні антени отримали найбільш широке розповсюдження в якості основних антен гідроакустичних комплексів та систем завдяки можливості забезпечення кругового огляду середовища при відносно невеликих апаратних витратах. [1, 2, 6] Циліндричні антени можуть встановлюватися на надводних

кораблях в носовому бульбовому обтікачі, в стаціонарному підкільному обтікачі, в підйомно-опускаємому пристрої або в буксируємому тілі. [2]

Циліндричні гідроакустичні антени можуть працювати в двох основних режимах випромінювання – в режимі кругового випромінювання, коли випромінювачі антени розміщені рівномірно і працюють одночасно, або в режимі секторного випромінювання, коли випромінювачі працюють одночасно лише в обраному секторі.

На рис.1.1 приведена схематично побудована кругова циліндрична акустична антена з м'яким акустичним екраном, розміщеним в середині антени.

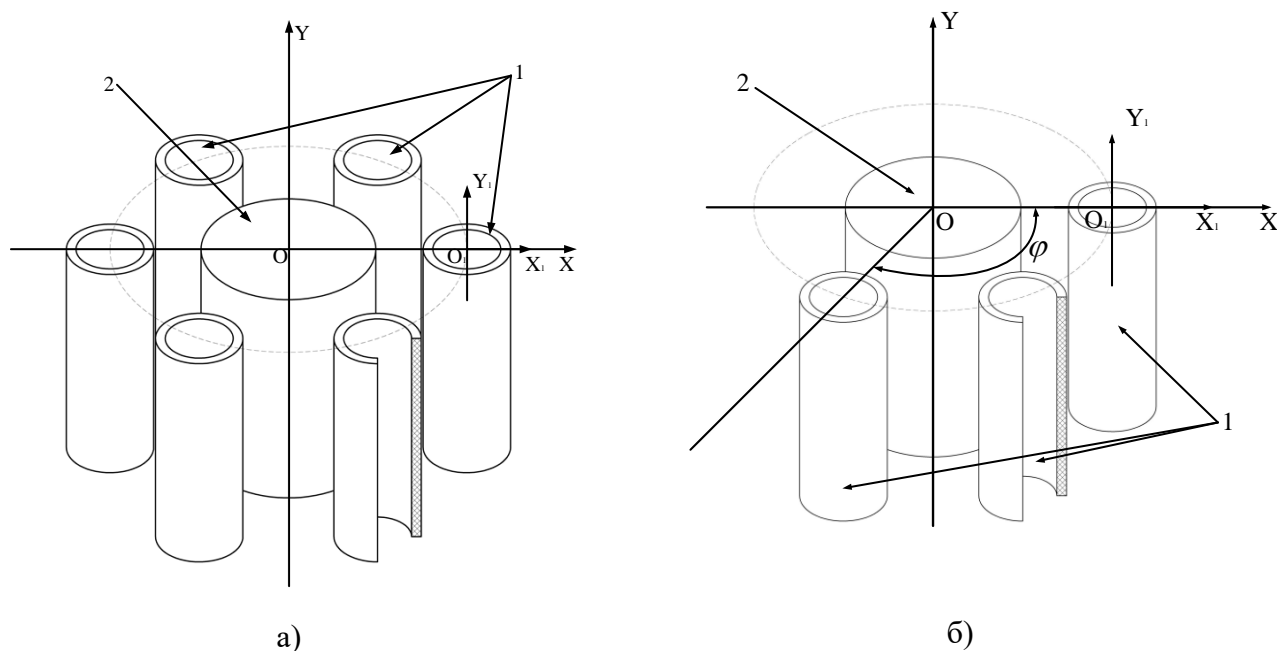


Рис.1.1 Схематична побудова кругової циліндричної антени з екраном.

Відповідно до рис.1.1 вважаємо, що антена складається із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів 1 та акустичного екрану 2, який представляє собою циліндр, виконаний із акустично м'якого матеріалу. П'єзокерамічний випромінювач 1 виконується у вигляді співосно розташованих кілець. Ці кільця можуть бути виконані, в залежності від обраного типу поляризації, у вигляді суцільного (окружна поляризація) (рис.1.2, а) коли електроди наносяться на зовнішню та внутрішню поверхні випромінювача, або секціонованого кільця (радіальна поляризація) (рис.1.2, б) коли вони набрані із склеєних між собою призм [6] з електродами на бокових гранях призми. Випромінювачі, набрані із секціонованих кілець, є більш ефективними, [4] причому, їх ефективність зростає із збільшенням числа призм. [5] Це пов'язано з тим, що поздовжній п'єзоефект, який використовується в

секціонованих випромінювачах, є більш ефективним за поперечний, який використовується в суцільних кільцях, тому що, п'єзомодуль поздовжнього п'єзоефекту завжди більший за п'єзомодуль поперечного.

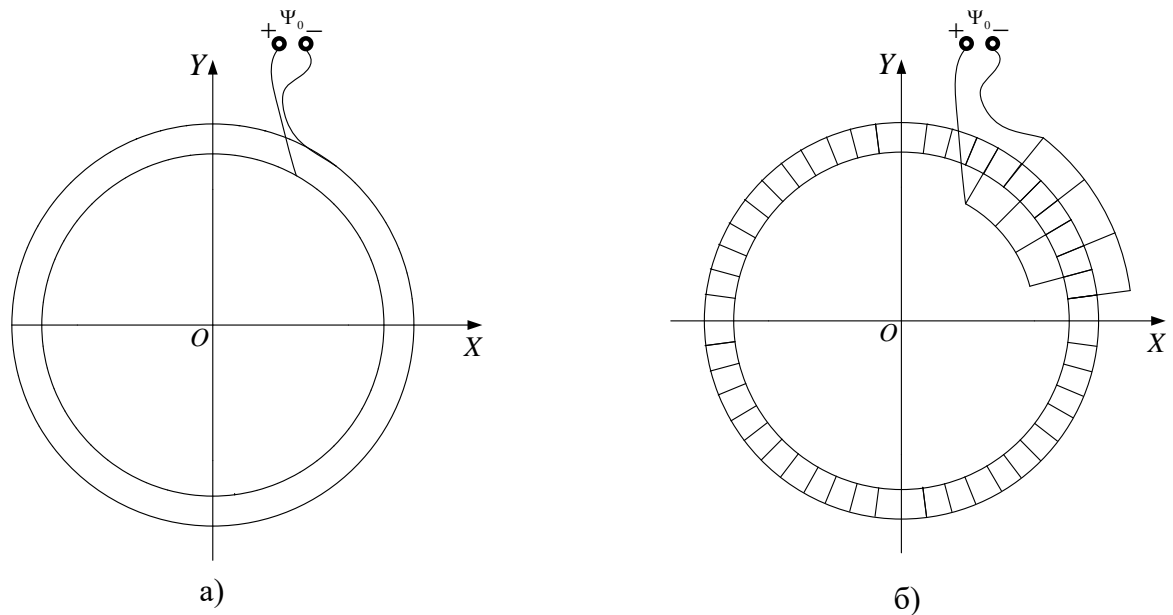


Рис.1.2 Конструкції циліндричних випромінювачів

Головними параметрами, які впливають на характеристики випромінювача, є його розміри, такі як його радіус та товщина, але, не менш важливим параметром для частотної характеристики є характер передачі зовнішнього навантаження на активний елемент випромінювача. Тому конструкції випромінювачів поділяються на два основних типи – випромінювачі силової та випромінювачі компенсованої конструкції [8, 13]. В першому випадку внутрішнє середовище випромінювача вакуумується або заповнюється повітрям при нормальному атмосферному тиску [52]. Така конструкція перетворювача зазвичай використовується на глибинах до 500 метрів, оскільки подальше нарощення товщини корпусу не є ефективним.

Для антен, які працюють на глибинах більших за 500 метрів, прийнято використовувати перетворювачі компенсованої конструкції, коли внутрішнє середовище перетворювача заповнюється рідиною або газом під тиском, що дозволяє компенсувати зовнішнє навантаження на перетворювач з боку середовища. Заповнення внутрішнього середовища перетворювача призводить до змінення його частотних характеристик, що дозволяє впливати на його характеристики шляхом

змінення заповнення перетворювача. [5, 49] Однак, перетворювачі компенсованої конструкції є досить складними в технічному плані.

Ще одним суттєвим параметром, який впливає на характеристики перетворювача, є вибір матеріалу, з якого виготовлений активний елемент перетворювача. [3] На сьогодні існує декілька десятків різновидів складів п'єзокераміки. [6] Всі вони відрізняються за своїми електричними, механічними та електромеханічними властивостями. Вибір того чи іншого матеріалу має відбуватися в залежності від призначення антени, адже, вона дуже суттєво впливає на ефективність роботи випромінювача. [7]

В гідроакустичних антенах часто використовуються акустичні екрани – звуковідбиваючі пасивні конструкції, які по суті виконують роль розсіювача звуку. Вони служать для покращення спрямованих властивостей антен та підвищення ефективності роботи випромінювача. В прийомних антенах акустичні екрани підвищують їх завадостійкість, виключаючи можливості прийому сигналів з небажаних напрямків, перш за все – тильного. В антенах же, які працюють в режимі випромінювання, акустичні екрани концентрують енергію в необхідному напрямку, збільшуючи випромінювану потужність на вісі ХН і зменшуючи рівень тильного і бокового випромінювання. Головними параметрами, які впливають на характеристики антени з екраном, є розміри екрану та відстань між екраном і перетворювачем. Варіюючи цими параметрами можна впливати на характеристики антени. [2, 8]

Таким чином, кількість перетворювачів, їх положення, відстань між екраном та перетворювачами та розміри екрана визначають фізичні поля антени. Під час роботи антени поля перетворювачів та екрану складаються між собою, формуючи сумарне поле акустичного тиску антени. [3]

Тому, для реальних конструкцій кругових циліндричних гідроакустичних антен з екранами, набраних із циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів, можна виділити ряд параметрів та характеристик конструкції, які обов'язково мають бути враховані при їх проектуванні. Для антен в цілому:

1. Певна геометрія та розміри;
2. Робота в заданому діапазоні частот;

3. Певна кількість п'єзокерамічних перетворювачів, кожен з яких має визначене місце в антенній решітці;

4. Розміри та положення екрана;

Для конструкцій випромінювачів у складі антенної решітки:

1. Певна геометрія та розміри;

2. Робота в заданому діапазоні частот;

3. Певний матеріал активного елемента перетворювача з заданою поляризацією;

4. Заданий тип конструкції, в залежності від умов роботи перетворювача;

5. Наявність середовища з певними характеристиками зовні перетворювача;

6. Наявність середовища з певними характеристиками всередині перетворювача (в залежності від вибраного типу конструкції).

## **1.2 Відображення особливостей конструкцій кругових циліндричних гідроакустичних антен з екранами в розрахункових моделях. Вибір методу вирішення задачі випромінювання**

В даний час відомі різноманітні підходи до строгого вирішення граничних задач, сформульованих в багатозв'язних областях. Вибір кожного з них залежить від конкретних особливостей взаємодіючих тіл. У випадку тіл довільної геометричної форми з достатньо гладкою випромінюючою або дифрагуючою поверхнею рішення граничних задач можна представити в замкнутій формі за допомогою функцій Гріна. При цьому рішення граничної задачі може бути приведене до вирішення системи із кінцевого числа інтегральних рівнянь типу Фредгольма першого або другого роду, кількість яких дорівнює кількості взаємодіючих тіл. Отримані в результаті системи рівнянь часто можуть бути вирішені, для достатньо загальних граничних умов, з досить високою точністю, числовими методами. Але на практиці цей метод виявляється придатним, тільки в тих випадках, коли хвильові розміри тіл малі, а відстань між ними значно більша, за довжину хвилі.

Другим відомим методом вирішення задач взаємодії, який можна використовувати для систем, що складаються із двох тіл, є метод Шварцшильда. Цей метод передбачає відому функцію Гріна окремого тіла і приводить до системи із двох інтегральних рівнянь Фредгольда другого роду, яка вирішується методом

поступових наближень. Але цей метод виявився зручним тільки у випадку, коли взаємодіючі тіла віддалені настільки, що амплітуда хвилі, розсіяної будь-яким із тіл в місці знаходження іншого, мала порівняно із амплітудою хвилі, випроміненою цим тілом.

Одним із методів строгого вирішення хвильових задач взаємодії декількох тіл, що не передбачає використання функції Гріна, є метод розділення змінних. Цей метод використовується у випадку, коли поверхні тіл допускають розділення рівняння Гельмгольца у відповідних криволінійних координатах, пов'язаних із кожним тілом. Він знайшов широке застосування при вирішенні задач дифракції як електромагнітних хвиль, так і пружних хвиль в тілах, що деформуються. Метод розділення змінних в багатозв'язних областях полягає в тому, що з кожним тілом пов'язують локальні координати системи, в яких поверхні тіл співпадають з одною із повних координатних поверхонь. Поле, випромінене або розсіяне системою взаємодіючих тіл, шукається у вигляді суми нескінченних рядів по локальним хвильовим функціям кожного із тіл. На основі граничних умов, заданих на поверхні кожного із тіл, визначаються невідомі коефіцієнти розкладень. Таким чином, являючись по суті методом рядів, цей метод дозволяє звести вихідну крайову задачу до рішення нескінченної лінійних алгебраїчних рівнянь. Такі системи перетворюються в системи нормального вигляду лінійною заміною невідомих, дякуючи чому для їх вирішення можна застосовувати метод редукції [54, 55, 56].

Застосування цього методу обумовлює необхідність застосування спеціальних формул – теорем додавання для хвильових функцій, за допомогою яких виконується перебудова рішення для зовнішнього середовища одного тіла в локальних координатах іншого тіла. Метод розділення змінних в багатозв'язних областях є ефективним засобом отримання чисельних значень шуканих полів в широкому діапазоні вихідних даних вирішуваних задач. Важливою перевагою цього методу є те, що в крайньому випадку виродження він дає рішення хвильової задачі для одиночного тіла.

Одним із методів вирішення хвильових задач взаємодії кінцевого числа тіл, не пов'язаних із застосуванням теорем додавання і який є по суті граничним випадком

виродження розглянутого раніше метода, є метод часткових областей, розглянутий в роботі [53]. Згідно із цим методом всі взаємодіючі тіла вписуються в одну й туж саму координатну систему, пов'язану із сукупністю взаємодіючих тіл. Поля випромінення або розсіяння представляються в кожній частковій області з урахуванням особливостей цих областей розкладеннями по відповідним хвильовим функціям прийнятої системи координат. Невідомі коефіцієнти розкладень також визначаються в результаті вирішення нескінченної системи алгебраїчних рівнянь[8].

Аналіз приведеної фізичної моделі антенної решітки показує, що при її роботі відбувається кілька фізичних процесів, які протікають одночасно та взаємодіють між собою. Процес перетворення енергії з механічної в акустичну, який супроводжується тим, що перетворювач утворює певне акустичне поле навколо себе та описується за допомогою хвильового рівняння та диференційними рівняннями електромеханічних коливань циліндричних тіл. Процес електромеханічного перетворення енергії в перетворювачі можна описати рівняннями стану п'єзокераміки та диференційними рівняннями електромеханічних коливань циліндричних тіл [51, 52]. Процес взаємодії перетворювачів та екрану за акустичним полем описується за допомогою хвильового рівняння [3]. Таким чином загальний процес роботи антени повинен описуватися диференційними рівняннями електропружних коливань циліндричної оболонки, рівняннями стану п'єзокераміки, хвильовими рівняннями розповсюдження коливань в середовищах. [3, 6, 9]

З урахуванням цих тверджень, фізична модель кругової циліндричної антени з екраном та процеси, що мають місце при її роботі, описані в попередньому параграфі, можуть бути представлені у вигляді наступної математичної моделі

Розглянемо задачу про випромінення звуку круговою циліндричною гідроакустичною антеною (рис.1.2), утвореною із скінченного числа циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів силової або компенсованої конструкції і циліндричного акустично м'якого екрана, розташованого у внутрішньому середовищі антени. Поздовжні вісі перетворювачів і екрану паралельні між собою. Кожен з випромінювачів представляє собою протяжну герметизовану п'єзокерамічну оболонку, внутрішня порожнина якої вакуумована або заповнена

повітрям з нормальним атмосферним тиском (силова конструкція) або в ній знаходиться рідина або повітря з надлишковим тиском (компенсована конструкція). Збудження перетворювачів в антенні відбувається шляхом підведення до обкладинок електродів кожного з перетворювачів гармонійного електричного сигналу, де  $\psi_0^{(s)}$  – електрична напруга,  $\omega$  – частота збудження, а  $s$  – номер випромінювача в антенній решітці. Акустичний екран виконаний у вигляді циліндричної оболонки, облицьованої акустично м'яким матеріалом, наприклад, звуковідбиваючою резиною з закритими повітряними порами, марок 10087 або 51-1415.

В самому загальному вигляді (рис.1.2) розрахункова модель антени, що розглядається, може бути представлена при введенні наступних припущень.

Будемо вважати, що антена утворена із  $N+1$  елементів з паралельними повздовжніми вісями, де  $N$  – число випромінювачів. Антена розміщена в рідинному середовищі з густиною  $\rho$  і швидкістю звуку  $c$ . В середині кожного випромінювача знаходиться середовище із густиною  $\rho_s$  і швидкістю звуку  $c_s$  ( $s=1,...,N$ ). При цьому самі випромінювачі представляють собою тонкі п'єзокерамічні оболонки із окружною або радіальною поляризацією.

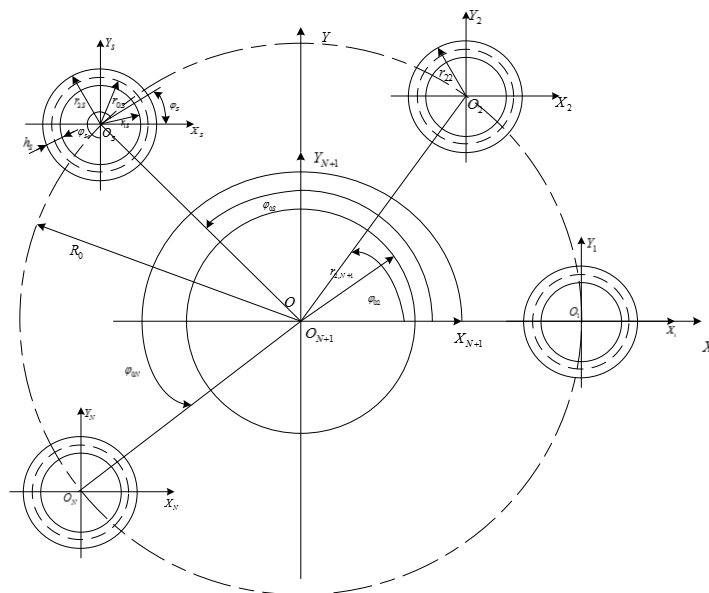


Рис. 1.2 Поперечний переріз розрахункової моделі кругової циліндричної антени з екраном, утвореної із п'єзокерамічних випромінювачів з радіальною поляризацією



Окружна поляризація створюється паралельним включенням жорстко склеєних між собою  $M_s$  призм, на бокові поверхні яких нанесені тонкі електроди.

Радіальна поляризація створюється нанесенням електродів на зовнішню та внутрішню поверхні суцільного п'єзокерамічного кільця.

Повздовжні вісі утворюючих антену випромінювачів розташовані навколо акустичного екрана на однаковій відстані  $R_0$  від його повздовжньої вісі.

Введемо ряд координатних систем: загальну  $OXYZ$  та локальні  $O_s x_s y_s z_s$  прямокутні системи і пов'язані з ними кругові циліндричні системи координат  $(R, \varphi, z)$  та  $(r_s, \varphi_s, z_s)$ . При цьому вісь  $OZ$  сумістимо з поздовжньою віссю екрана, а вісі  $O_s Z_s$  направимо уздовж поздовжніх вісей перетворювачів ( $s = 1, \dots, N$ ) і екрана ( $s = N+1$ ). Вісь  $OX$  направимо вздовж лінії  $O_{N+1}O_1$  центрів екрана і першого випромінювача в нормальному перерізі антени площиною  $Z=0$ , а вісі  $O_s X_s$  проведемо паралельно їй. Позначимо зовнішній радіус екрана через  $r_{2,N+1}$ , а серединні радіуси і товщини випромінювачів через  $r_{0s}$  і  $h_s$  відповідно. Для випромінювачів виконується умова  $\frac{h_s}{r_{0s}} \ll 1$ . Справедливість такого вибору

обґрунтовується тим, що на практиці майже завжди випромінювачі такого типу формують суттєві направлені властивості саме в площині своєї поздовжньої вісі [14]. Ця умова дозволяє перейти до моделі, коли висота циліндру вважається нескінченно великою і розподіл коливальної швидкості на поверхні циліндру вздовж його твірної осі вважається рівномірним. Такий підхід дозволяє знехтувати впливом торців антени на розподілення поля в площині, нормальній до її поздовжньої вісі.

Відповідно до введеної системи координат, представимо диференціальні рівняння стану п'єзокераміки в циліндричних координатах. Для п'єзокерамічного циліндру з радіальною поляризацією рівняння стану п'єзокераміки в циліндричних координатах мають наступний вигляд [10]:

$$\begin{aligned}
\sigma_{rr} &= C_{33}^E \varepsilon_{rr} + C_{13}^E (\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{zz}) - e_{33} E_r; \\
\sigma_{\varphi\varphi} &= C_{13}^E \varepsilon_{rr} + C_{11}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} + C_{12}^E \varepsilon_{zz} - e_{31} E_r; \\
\sigma_{zz} &= C_{13}^E \varepsilon_{rr} + C_{12}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} + C_{11}^E \varepsilon_{zz} - e_{31} E_r; \\
\sigma_{r\varphi} &= C_{44}^E \varepsilon_{r\varphi} - e_{15} E_\varphi; \\
\sigma_{rz} &= C_{44}^E \varepsilon_{rz} - e_{15} E_z; \\
\sigma_{\varphi z} &= \frac{1}{2} (C_{11}^E - C_{12}^E) \varepsilon_{\varphi z}; \\
D_r &= \varepsilon_{33}^S E_r + e_{31} (\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{zz}) + e_{33} \varepsilon_{rr}; \\
D_\varphi &= \varepsilon_{11}^S E_\varphi + e_{15} \varepsilon_{r\varphi}; \\
D_z &= \varepsilon_{11}^S E_z + e_{15} \varepsilon_{rz},
\end{aligned}$$

Для п'єзокерамічного циліндру з окружною поляризацією.

$$\begin{aligned}
\sigma_{rr} &= C_{11}^E \varepsilon_{rr} + C_{13}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} + C_{12}^E \varepsilon_{zz} - e_{31} E_\varphi; \\
\sigma_{\varphi\varphi} &= C_{13}^E (\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{zz}) + C_{33}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} - e_{33} E_\varphi; \\
\sigma_{zz} &= C_{12}^E \varepsilon_{rr} + C_{13}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} + C_{11}^E \varepsilon_{zz} - e_{31} E_\varphi; \\
\sigma_{r\varphi} &= C_{44}^E \varepsilon_{r\varphi} - e_{15} E_r; \\
\sigma_{\varphi z} &= C_{44}^E \varepsilon_{\varphi r} - e_{15} E_z; \\
\sigma_{rz} &= \frac{1}{2} (C_{11}^E - C_{12}^E) \varepsilon_{rz}; \\
D_\varphi &= \varepsilon_{33}^S E_\varphi + e_{31} (\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{zz}) + e_{33} \varepsilon_{\varphi\varphi}; \\
D_r &= \varepsilon_{11}^S E_r + e_{15} \varepsilon_{r\varphi}; \\
D_z &= \varepsilon_{11}^S E_r + e_{15} \varepsilon_{z\varphi},
\end{aligned}$$

де  $\sigma_x = \sigma_{xx}$ ,  $\sigma_y = \sigma_{yy}$ ,  $\sigma_z = \sigma_{zz}$ ,  $\sigma_{yz}$ ,  $\sigma_{zx}$ ,  $\sigma_{xy}$  – компоненти тензора механічних напруг;  
 $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ ,  $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$  – відповідно складові вектора напруженості  $\vec{E}$  та індукції  $\vec{D}$   
електричного поля;  $C_{11}^E$ , ...  $C_{15}^E$  – модулі пружності при нульовій електричній напруженості;  $e_{31}$ , ...  $e_{15}$  – п'єзомодулі;  $\varepsilon_{11}^S$ , ...  $\varepsilon_{33}^S$  – діелектричні проникності при нульовій деформації;  $\varepsilon_x = \varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_y = \varepsilon_{yy}$ ,  $\varepsilon_z = \varepsilon_{zz}$ ,  $\varepsilon_{yz}$ ,  $\varepsilon_{zx}$ ,  $\varepsilon_{xy}$  – компоненти тензора механічних деформацій.

Компоненти тензора механічних деформацій в свою чергу описуються співвідношеннями Коші:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_r &= \frac{\partial w}{\partial r}, \quad \varepsilon_\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \frac{w}{r}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial v}{\partial z}, \\
\varepsilon_{rz} &= \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r}, \quad \varepsilon_{z\varphi} = \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \varepsilon_{r\varphi} = \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \varphi},
\end{aligned}$$

де  $w$ ,  $u$  та  $v$  – відповідно радіальні, тангенціальні та осьові компоненти вектору зміщень.

Оскільки кожен з випромінювачів у складі антени може мати свої фізичні та конструктивні особливості надалі будемо записувати усі вирази відносно  $s$ -го перетворювача у складі антенної решітки.

Електричні умови задачі описуються рівняннями вимушеної електростатики для  $s$ -го випромінювача.

$$\vec{E}^{(s)} = -\text{grad}\psi^{(s)}; \text{div}\vec{D}^{(s)} = 0 \quad (1.1)$$

де  $\vec{E}_r^{(s)}$ ,  $\vec{D}_r^{(s)}$  – вектори напруженості та індукції електричного поля.

З урахуванням рівнянь стану п'єзокераміки, доповнених співвідношеннями Коші, рівняннями вимушеної електростатики та рівнянь руху п'єзокерамічного елемента, можна перейти до диференціальних рівнянь електромеханічних коливань  $s$ -го циліндричного випромінювача в вакуумі у циліндричних координатах [6, 15, 16]. Для випромінювачів з окружною поляризацією вони мають наступний вид [11]:

$$\left(1 + \beta^{(s)}\right) \frac{\partial^2 u^{(s)}}{\partial \varphi_s^2} + \frac{\partial w^{(s)}}{\partial \varphi_s} - \beta^{(s)} \frac{\partial^3 w^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} = \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \frac{\partial^2 u^{(s)}}{\partial t^2}, \quad (1.2)$$

$$-\frac{\partial u^{(s)}}{\partial \varphi_s} + \beta^{(s)} \left( \frac{\partial^3 u^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} - \frac{\partial^4 w^{(s)}}{\partial \varphi_s^4} \right) - w^{(s)} + \frac{e_{33}^{(s)} r_{os}}{C_{33}^{E(s)}} E_{\theta}^{(0)s} + \frac{\alpha^{(s)}}{h_s} q_r^{(s)} = \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \frac{\partial^2 w^{(s)}}{\partial t^2}. \quad (1.3)$$

Для випромінювачів з радіальною поляризацією дійсні такі вирази [6]:

$$\left(1 + \beta^{(s)}\right) \frac{\partial^2 u^{(s)}}{\partial \varphi_s^2} + \frac{\partial w^{(s)}}{\partial \varphi_s} - \beta^{(s)} \frac{\partial^3 w^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} = \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \frac{\partial^2 u^{(s)}}{\partial t^2}, \quad (1.4)$$

$$-\frac{\partial u^{(s)}}{\partial \varphi_s} + \beta^{(s)} \left( \frac{\partial^3 u^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} - \frac{\partial^4 w^{(s)}}{\partial \varphi_s^4} \right) - w^{(s)} + \frac{e_{33}^{(s)} r_{os}}{C_{11}^{E(s)}} E_r^{(0)s} + \frac{\alpha^{(s)}}{h_s} q_r^{(s)} = \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \frac{\partial^2 w^{(s)}}{\partial t^2}. \quad (1.5)$$

Тут  $u^{(s)}$ ,  $w^{(s)}$  – тангенціальна та радіальна складові вектору зміщень точок серединної поверхні  $s$ -го випромінювача;  $\beta^{(s)} = (h_s)^2 / 12 r_{os}^2 \left( 1 + \left( e_{31}^{(s)} \right)^2 / C_{11}^{E(s)} \varepsilon_{33}^{s(s)} \right)$ ,

$\alpha^{(s)} = r_{os}^2 / C_{11}^{E(s)}$  – для радіальної поляризації;  $\beta^{(s)} = (h_s)^2 / 12 r_{os}^2 \left( 1 + \left( e_{33}^{(s)} \right)^2 / C_{33}^{E(s)} \varepsilon_{33}^{s(s)} \right)$ ,

$\alpha^{(s)} = r_{os}^2 / C_{33}^{E(s)}$  – для окружної поляризації;  $q_r^{(s)}$  – зовнішнє навантаження  $s$ -го випромінювача;  $C_{11}^{E(s)}$ ,  $\varepsilon_{33}^{s(s)}$ ,  $e_{31}^{(s)}$  – модулі пружності при нульовій електричній

напруженості, діелектрична проникність при нульовій деформації та п'єзоконстанта матеріалу випромінювача, відповідно;  $\gamma^{(s)}$  – густина матеріалу;  $E_{\theta}^{(0)s}$  та  $E_r^{(0)s}$  – електрична напруженість в матеріалі s-го випромінювача для тангенціальної та радіальної поляризації, відповідно.

Поширення в зовнішньому та внутрішньому середовищі кожного s-го випромінювача акустичних хвиль описується хвильовим рівнянням Гельмгольца для гармонічних коливань:

$$\Delta^2 \Phi^{(s)} + (k_{is})^2 \Phi^{(s)} = 0; \quad (1.6)$$

де  $\Phi^{(s)}$  – потенціал коливальної швидкості s-го випромінювача,  $\Delta$  – оператор Лапласа в циліндричній системі координат,  $k_s = 2\pi/\lambda$  – хвильове число s-го випромінювача ( $i = 1, 2$  – відповідно зовнішнє та внутрішнє середовище).

Область існування звукового поля є багатозв'язною, оскільки звукові поля випромінювачів формуються в двох областях – зовнішній –  $\Phi_1^{(s)}$  і внутрішній –  $\Phi_2^{(s)}$ , а акустичного екрана  $\Phi_1^{(N+1)}$  – тільки в зовнішній. Границі середовищ визначаються співвідношеннями: для внутрішніх областей  $0 \leq |\varphi_s| \leq \pi$ ,  $0 \leq r_s \leq r_{1s} = r_{0s} - \frac{h_s}{2}$ ,  $S = 1, \dots, N$ ; для зовнішніх областей  $0 \leq |\varphi_s| \leq \pi$ ,  $r_s \geq r_{2s} = r_{0s} + \frac{h_s}{2}$ ,  $S = 1, \dots, N$ ;  $r_{N+1} > r_{2,N+1}$ . З урахуванням приведених границь кінематичні і динамічні умови сполучення звукових полів на цих границях приймають вигляд:

– на поверхнях кожного випромінювача виконуються умови рівності швидкостей коливань часток середовищ і швидкостей нормальних зміщень поверхонь випромінювачів:

$$\bullet - \frac{\partial \Phi_1(r_s, \varphi_s)}{\partial r_s} = \frac{\partial w^{(s)}}{\partial t}, \quad 0 \leq |\varphi_s| \leq \pi, \quad r_s = r_{2s}, \quad S = 1, \dots, N; \quad (1.7)$$

$$\bullet - \frac{\partial \Phi_2^{(s)}(r_s, \varphi_s)}{\partial r_s} = \frac{\partial w^{(s)}}{\partial t}, \quad 0 \leq |\varphi_s| \leq \pi, \quad r_s = r_{1s}, \quad S = 1, \dots, N, \quad (1.8)$$

де  $\Phi_1(r_s, \varphi_s)$  – поле випромінювання антени, записане в координатах s - го випромінювача;

– на поверхні кожного випромінювача виконується умова рівності нормальної складової тензора напруг  $\sigma_r^{(S)}$  звуковому тиску, взятому із протилежним знаком:

$$-\sigma_r = q_r = -(p_1 - p_2^{(S)}), \quad 0 \leq |\varphi_S| \leq \pi, \quad r_S = r_{2S}, \quad S = 1, \dots, N; \quad (1.9)$$

де  $p_1 = \rho \frac{\partial \Phi_1}{\partial t}$  і  $p_2^{(S)} = \rho_S \frac{\partial \Phi_2^{(S)}}{\partial t}$  – радіаційні навантаження від динамічних тисків;

– на поверхні акустично м'якого екрану виконується рівність нулю звукового тиску:

$$\Phi_1^{(N+1)} = 0, \quad 0 \leq |\varphi_{N+1}| \leq \pi, \quad r_{N+1} = r_{2,N+1}; \quad (1.10)$$

Електричні граничні умови з урахуванням динамічного деформування  $S$ -го циліндричного випромінювача напругою  $\psi^{(S)} = \psi_0^{(S)} e^{-i\omega t}$  і рівнянь (1.1) приймають вигляд:

– напруженість електричного поля в матеріалі п'єзокерамічної оболонки  $S$ -го випромінювача при окружній поляризації дорівнює:

$$E_\varphi^{(S)} = -\frac{\psi_0^{(S)} M_{(S)}}{2\pi r_{0S}}, \quad S = 1, \dots, N; \quad (1.11)$$

– напруженість електричного поля в матеріалі п'єзокерамічної оболонки  $S$ -го випромінювача при радіальній поляризації дорівнює:

$$E_r^{(S)} = -\psi_0^{(S)} / h_s, \quad S = 1, \dots, N; \quad (1.12)$$

– компоненти електричної індукції вздовж радіуса  $D_r^{(S)}$ , поздовжньої вісі  $D_z^{(S)}$  і окружності  $D_\varphi^{(S)}$  дорівнюють відповідно:

• для окружної поляризації:

$$D_r^{(S)} = 0; \quad D_z^{(S)} = 0; \quad D_\varphi^{(S)} = \varepsilon_{33}^{(S)} E_\varphi^{(S)} + e_{33}^{(S)} \left( \frac{1}{r_S} \frac{\partial u^{(S)}}{\partial \varphi_S} + \frac{w^{(S)}}{r_S} \right); \quad (1.13)$$

• для радіальної поляризації:

$$D_r^{(S)} = \varepsilon_{33}^{(S)} E_r^{(S)} + e_{31}^{(S)} \left( dU^{(S)} / d\varphi_S + W^{(S)} \right) / r_{0S} + e_{33}^{(S)} \left( dW^{(S)} / dr_{0S} \right); \quad D_\varphi^{(S)} = D_z^{(S)} = 0; \quad D_r^{(S)} = D_z^{(S)} = 0 \quad (1.14)$$

Перераховані умови доповнюються умовами випромінювання на нескінченності та відсутністю особливостей у внутрішніх середовищах кожного із випромінювачів антени.

Таким чином з приведеного витікає, що для вирішення задачі будуть використані наступні методи та підходи:

- метод розділення змінних для сумісного рішення диференціальних рівнянь, що описують характеристики кожного з досліджуваних фізичних полів, а саме акустичного (рівняння Гельмгольца), механічного (рівняння руху випромінювачів) та електричного (рівняння вимушеної електростатики);
- метод часткових областей, що полягає у розділенні середовища на окремі області, що взаємодіють між собою за рахунок граничних умов (внутрішнє та зовнішнє середовище випромінювача);
- метод зв'язаних полів в батозв'язних областях;
- теорема додавання циліндричних функцій для урахування взаємодії випромінювачів у складі антени за акустичним полем.

Вибір саме цих методів і такого підходу до вирішення задачі пов'язаний із необхідністю отримання кількісних характеристик що описують фізичні поля, утворювані круговою циліндричною гідроакустичною антеною з екраном. Ці методи являються ефективними і ними користувалися при вирішенні багатьох задач, пов'язаних із визначенням акустичного поля різних типів антен. [3, 6, 11, 57-72].

### **1.3 Розв'язок задачі визначення фізичних полів кругових циліндричних гідроакустичних антен з екраном, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів силової та компенсованої конструкцій з окружною поляризацією**

Розв'язок задачі випромінювання звуку круговою циліндричною гідроакустичною антеною з екраном для випадків окружної та радіальної поляризації мають свої особливості. Тому доцільно розглядати їх окремо.

Використовуючи рівняння (1.1) – (1.13). виконаємо розв'язок задачі випромінювання відповідно до моделі, представленій у підрозділ 1.2.

У випадку окружної поляризації конструкція активного елементу випромінювача в антені представляє собою кільце, склеєне з  $M_s$  однакових призм. Електрично всі призми включені паралельно. До обкладок призм прикладено електричний сигнал  $\psi^{(s)} = \psi_0^{(s)} e^{-i\omega t}$ , де  $s$  – номер випромінювача в антенній решітці.

Для розв'язання сформульованої задачі використаємо метод зв'язаних полів в багатозв'язних областях. Представимо зміщення оболонок випромінювачів, які описують механічні поля випромінювачів, у вигляді розкладень  $u^{(S)}$  та  $w^{(S)}$  за власними формами коливань оболонок в вакуумі:

$$u^{(S)} = \sum_n u_n^{(S)} e^{in\varphi_S}; \quad w^{(S)} = \sum_n w_n^{(S)} e^{in\varphi_S}; \quad S = 1, \dots, N; \quad (1.15)$$

Коефіцієнти  $u^{(S)}$  та  $w^{(S)}$  приймають участь у врахуванні взаємодії акустичних, механічних та електричних полів в процесі перетворення електричної енергії в механічну.

Акустичне поле антени в оточуючому її середовищі представимо у вигляді суперпозиції полів  $\Phi_1^{(S)}$ , створених кожним із елементів антени

$$\Phi_1 = \sum_{S=1}^{N+1} \Phi_1^{(S)}; \quad (1.16)$$

При цьому всі поля  $\Phi_1^{(S)}$  повинні визначатися з урахуванням взаємодії всіх елементів антени між собою за акустичним полем. Ця взаємодія виникає в результаті багатократного розсіяння хвиль, які створюються кожним із випромінювачів антени та розсіяні її акустичним екраном, на всіх елементах антени.

Акустичні поля, які створюються кожним із випромінювачів і екраном у зовнішньому середовищу, представимо розкладеннями за хвильовими циліндричними функціями, які задовольняють умові випромінення у нескінченність:

$$\Phi_1^{(S)}(r_S, \varphi_S) = \sum_n A_n^{(S)} H_n^{(1)}(kr_S) e^{in\varphi_S}, \quad S = 1, \dots, N+1 \quad (1.17)$$

Акустичні поля, які виникають при випромінненні звуку у внутрішніх областях випромінювачів, можливо описати за допомогою виразу:

$$\Phi_2^{(S)}(r_S, \varphi_S) = \sum_n B_n^{(S)} J_n(k_2^{(S)} r_S) e^{in\varphi_S}, \quad S = 1, \dots, N \quad (1.18)$$

В співвідношеннях (1.17) та (1.18) використані традиційні позначення циліндричних функцій; через коефіцієнти  $A_n^{(S)}$  враховується взаємодія елементів антени по зовнішньому акустичному полю, обумовлена багатократним розсіянням

хвиль; через коефіцієнти  $B_n^{(S)}$  враховується взаємодія акустичних і механічних полів кожного випромінювача у внутрішній порожнині.

Для визначення коефіцієнтів розкладення  $u_n^{(S)}$ ,  $w_n^{(S)}$ ,  $A_n^{(S)}$ ,  $B_n^{(S)}$  необхідно використати співвідношення (1.2), (1.3), (1.7) – (1.9). Підстановка (1.15) у вираз (1.2) дозволяє виразити  $u_n^{(S)}$  через  $w_n^{(S)}$  в наступному вигляді:

$$u_n^{(S)} = \frac{i(n + \beta_s n^3)}{(1 + \beta_s) n^2 - \omega^2 \alpha_s \gamma_s} w_n^{(S)} \quad (1.19)$$

Оскільки поля, що входять в вираз (1.16) задані в локальних координатних системах, то вираз (1.17) не може бути підставлений в граничні умови (1.7) – (1.13) і рівняння (1.1) і потребують бути представленими в координатах того елемента, граничні умови, якого розглядаються. Перенесення систем координат забезпечується використанням теорем додавання для хвильових циліндричних функцій (1.20). [12]

$$H_m^{(1)}(kr_q) e^{im\varphi_q} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(kr_s) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qs}) e^{i(m-n)\varphi_{qs}} e^{in\varphi_s} \quad (1.20)$$

Тоді поле випромінювання кругової циліндричної антени з екраном в локальних координатах  $S$  - го елемента антени може бути записаним в наступному вигляді:

$$\Phi_1(r_s, \varphi_s) = \sum_n A_n^{(S)} H_n^{(1)}(kr_s) e^{in\varphi_s} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq S}}^{N+1} \sum_m A_m^{(q)} \sum_n J_n(kr_s) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qs}) e^{i(m-n)\varphi_{qs}} e^{in\varphi_s} \quad (1.21)$$

де  $r_{qs}$  та  $\varphi_{qs}$  – координати початку  $\theta_s$   $s$  – тої координатної системи в координатах  $q$  – тої системи.

Підстановка співвідношень (1.11), (1.18), (1.19) та (1.21) в вирази (1.4), (1.5) та (1.7) – (1.9) дозволяє на основі властивостей повноти та ортогональності систем кутових функцій на інтервалі  $[0; 2\pi]$  отримати нескінченну систему лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення невідомих коефіцієнтів в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} -B_n^{(S)} J_n'(k_2^{(S)} r_{1s}) + i c_2^{(S)} w_n^{(S)} &= 0, \quad S = 1, \dots, N, \quad n = -\infty, 0, \infty; \\ ic w_n^{(S)} - \left[ A_n^{(S)} H_n^{(1)'}(kr_{2s}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq S}}^{N+1} \sum_m A_m^{(q)} J_n'(kr_{2s}) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qs}) e^{i(m-n)\varphi_{qs}} \right] &= 0, \quad S = 1, \dots, N, \quad n = -\infty, 0, \infty; \end{aligned}$$



$$A_n^{(N+1)} H_n^{(1)}(kr_{2,N+1}) + \sum_{q=1}^N \sum_m A_m^{(N+1)} J_n'(kr_{2,N+1}) H_{m-n}^{(1)}(kr_{q,N+1}) e^{i(m-n)\varphi_{q,N+1}} = 0, \quad n = -\infty, 0, \infty; \quad (1.22)$$

$$R_n^{(S)} w_n^{(S)} + \frac{\alpha_S}{h_S} i\omega\rho \left[ A_n^{(S)} H_n^{(1)}(kr_{1S}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq S}}^{N+1} \sum_m A_m^{(q)} J_n(kr_{2S}) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qS}) e^{i(m-n)\varphi_{qS}} \right] -$$

$$- \frac{\alpha_S}{h_S} i\omega\rho_s B_n^{(S)}(k_2 r_{1S}) J_n(k_2^{(S)} r_{1S}) = - \frac{e_{33}^{(S)}}{C_{33}^{E(S)}} \frac{N^{(S)} \psi_0^{(S)}}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{in\varphi} d\varphi, \quad S = 1, \dots, N; \quad n = -\infty, 0, \infty,$$

$$\text{де } R_n^{(S)} = \frac{n^2(1 + \beta_S n^2)^2 - (1 + \beta_S n^4 - \alpha_S \gamma_S \omega^2) [n^2 + \beta_S n^2 - \alpha_S \gamma_S \omega^2]}{(1 + \beta_S) n^2 - \alpha_S \gamma_S \omega^2}$$

Заміна  $A_n^{(s)}$  та  $B_n^{(s)}$  новими невідомими  $\tilde{A}_n^{(s)}$  та  $\tilde{B}_n^{(s)}$  за формулами  $\tilde{A}_n^{(s)} = A_n^{(s)} H_n^{(1)'}(kr_{1s})$  та  $\tilde{B}_n^{(s)} = B_n^{(s)} J_n'(k_s r_{2s})$ , згідно із роботами [17, 18] дозволяє перетворити нескінченну систему (1.22) до вигляду квазірегулярної і застосувати для її вирішення метод редукції або послідовних наближень.

Отримані в результаті рішення нескінченної системи (1.22) коефіцієнти  $u_n^{(s)}$ ,  $w_n^{(s)}$ ,  $A_n^{(s)}$  и  $B_n^{(s)}$  визначають фізичні поля кругових циліндричних антен з екранами, при формуванні яких враховуються як взаємодія електричних, механічних та акустичних полів в процесі перетворення енергії в акустичну у випромінювачах решітки, так і взаємодія випромінювачів та екрану між собою, зумовлена багатократним розсіянням хвиль на елементах решітки та впливом реакції середовища.

В системі рівнянь (1.22) співвідношення для визначення невідомих коефіцієнтів складаються з двох частин, всі елементи яких мають чіткий фізичний сенс. Подвійні суми, що містяться в лівих частинах характеризують взаємодію перетворювачів з номерами  $s$  та  $q$  в результаті обміну між ними звуковими хвилями  $n$ -го та  $m$ -го порядків розсіяння, величина яких залежить від відстані між перетворювачами (визначає множник  $H_{n-m}^{(1)}(kr_{sq})$ ). Множники  $J_m'(kr_{1s})/H_n^{(1)'}(kr_{1s})$ , що входять в подвійні суми відповідають коефіцієнтам розкладень звукового поля, розсіяного одиночним абсолютно жорстким циліндром при дифракції звукових хвиль на ньому [8]. Усі інші елементи лівих частин описують взаємодію механічних полів оболонок випромінювачів зі звуковими полями всередині і решітки в цілому у зовнішньому просторі, їх залежність від частоти електричного збудження перетворювачів.

Отримані співвідношення дозволяють розрахувати в частині акустичних полів: розподіл амплітуд звукових тисків в ближній зоні антенної решітки, що дозволяє виявити можливі зони виникнення кавітації при роботі антенних решіток; характеристики спрямованості антенних решіток та частотні залежності потужності, що випромінюється кожним елементом решітки; активні та реактивні складові імпедансів випромінювання. Ці параметри дозволяють оцінити акустичні характеристики антени, що проектується.

В частині механічних полів: частотні та кутові залежності розподілу фаз та амплітуд радіальної та окружної коливальних швидкостей та мод коливань, що входять до їх складу для кожного випромінювача решітки. Ці параметри дозволяють визначити механічний стан випромінювачів та їх механічну міцність.

В частині електричних полів: частотні залежності електричних струмів та вхідних електричних опорів випромінювачів. Ці параметри необхідні для узгодження імпедансів випромінювачів та генераторів, що їх збуджують, та визначення електричних струмів, що характеризують якість перетворення електричної енергії в механічну перетворювачами конкретного типу і конструкції.

#### **1.4 Розв'язок задачі визначення фізичних полів кругових циліндричних антен з екраном, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів силової та компенсованої конструкцій з радіальною поляризацією**

Використовуючи рівняння 1.1 – 1.14, аналогічно підрозділу 1.3 вирішимо задачу випромінювання звуку круговою циліндричною антеною з екраном, утвореною із п'єзокерамічних випромінювачів з радіальною поляризацією.

У випадку радіальної поляризації конструкція активного елементу випромінювача в антені представляє собою суцільне кільце. До обклашок ззовні та в середині кільця прикладено електричний сигнал  $\psi^{(s)} = \psi_0^{(s)} e^{-i\omega t}$ , де  $s$  – номер випромінювача в антенній решітці.

Для вирішення сформульованої задачі використаємо метод зв'язаних полів в багатозв'язних областях. Представимо зміщення оболонок випромінювачів, які описують механічні поля випромінювачів, у вигляді розкладень  $u^{(s)}$  та  $w^{(s)}$  за власними формами коливань оболонок в вакуумі (1.15)

Коефіцієнти  $u^{(S)}$  та  $w^{(S)}$  дозволяють врахувати взаємодію акустичних, механічних та електричних полів в процесі перетворення електричної енергії в механічну.

Акустичне поле антени в оточуючому її середовищі представимо у вигляді суперпозиції полів  $\Phi_1^{(S)}$ , створених кожним із елементів антени (1.16)

При цьому всі поля  $\Phi_1^{(S)}$  повинні визначатися з урахуванням взаємодії всіх елементів антени між собою за акустичним полем, яке виникає в результаті багатократного розсіяння хвиль на всіх елементах антени.

Акустичні поля, які створюються випромінювачами і екраном у зовнішньому середовищу, представимо розкладеннями за хвильовими циліндричними функціями, які задовольняють умові випромінення у нескінченність.

Для визначення коефіцієнтів розкладення  $u_n^{(S)}$ ,  $w_n^{(S)}$ ,  $A_n^{(S)}$ ,  $B_n^{(S)}$  необхідно використати співвідношення (1.2), (1.3), (1.7) – (1.9). Підстановка (1.15) в вирази (1.2) дозволяє виразити  $u_n^{(S)}$  через  $w_n^{(S)}$  в наступному вигляді(1.19).

Оскільки поля, що входять в вираз (1.23) задані в локальних координатних системах, то він не може бути підставлений в граничні умови (1.7) – (1.14) і рівняння (1.1) і потребує бути представленими в координатах того елемента, граничні умови, якого розглядаються. Перенесення систем координат забезпечується використанням теорем додавання для хвильових циліндричних функцій (1.20).

Тоді поле випромінення кругової циліндричної антени з екраном в локальних координатах  $S$  - го елемента антени може бути записаним в наступному вигляді(1.21).

Підстановка співвідношень (1.12), (1.18), (1.19) та (1.21) в вирази (1.4), (1.5) та (1.7) – (1.9) дозволяє на основі властивостей повноти та ортогональності систем кутових функцій на інтервалі  $[0; 2\pi]$  отримати нескінченну систему лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення невідомих коефіцієнтів в наступному вигляді:

$$-B_n^{(S)} J_n'(k_2^{(S)} r_{1S}) + i c_2^{(S)} w_n^{(S)} = 0, \quad S = 1, \dots, N, \quad n = -\infty, 0, \infty;$$

$$icw_n^{(S)} - \left[ A_n^{(S)} H_n^{(1)'}(kr_{2S}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq S}}^{N+1} \sum_m A_m^{(q)} J_n'(kr_{2S}) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qS}) e^{i(m-n)\varphi_{qS}} \right] = 0, \quad S = 1, \dots, N, \quad n = -\infty, 0, \infty;$$

$$A_n^{(N+1)} H_n^{(1)}(kr_{2,N+1}) + \sum_{q=1}^N \sum_m A_m^{(N+1)} J_n'(kr_{2,N+1}) H_{m-n}^{(1)}(kr_{q,N+1}) e^{i(m-n)\varphi_{q,N+1}} = 0, \quad n = -\infty, 0, \infty; \quad (1.30)$$

$$R_n^{(S)} w_n^{(S)} + \frac{\alpha_S}{h_S} i\omega\rho \left[ A_n^{(S)} H_n^{(1)}(kr_{1S}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq S}}^{N+1} \sum_m A_m^{(q)} J_n(kr_{2S}) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qS}) e^{i(m-n)\varphi_{qS}} \right] -$$

$$- \frac{\alpha_S}{h_S} i\omega\rho_S B_n^{(S)}(k_2 r_{1S}) J_n(k_2^{(S)} r_{1S}) = - \frac{e_{31}^{(S)}}{C_{11}^{E(S)}} \frac{r_{0S} \psi_0^{(S)}}{h} \int_0^{2\pi} e^{in\varphi} d\varphi, \quad S = 1, \dots, N; \quad n = -\infty, 0, \infty,$$

$$\text{де } R_n^{(S)} = \frac{n^2(1 + \beta_S n^2)^2 - (1 + \beta_S n^4 - \alpha_S \gamma_S \omega^2) [n^2 + \beta_S n^2 - \alpha_S \gamma_S \omega^2]}{(1 + \beta_S) n^2 - \alpha_S \gamma_S \omega^2}$$

Заміна  $A_n^{(s)}$  та  $B_n^{(s)}$  новими невідомими  $\tilde{A}_n^{(s)}$  та  $\tilde{B}_n^{(s)}$  за формулами  $\tilde{A}_n^{(s)} = A_n^{(s)} H_n^{(1)'}(kr_{1s})$  та  $\tilde{B}_n^{(s)} = B_n^{(s)} J_n'(k_s r_{2s})$  дозволяє перетворити нескінченну систему (1.30) до вигляду квазірегулярної і застосувати для її вирішення метод усічення або послідовних наближень.

Отримані в результаті рішення нескінченної системи (1.30) коефіцієнти  $u_n^{(s)}$ ,  $w_n^{(s)}$ ,  $A_n^{(s)}$  и  $B_n^{(s)}$  визначають фізичні поля кругових циліндричних антен з екранами, утвореними із випромінювачів з радіальною поляризацією, при формуванні яких враховуються: взаємодія електричних, механічних та акустичних полів в процесі перетворення енергії в акустичну у випромінювачах решітки; взаємодія випромінювачів та екрану між собою, зумовлена багатократним розсіянням хвиль на елементах решітки; реакція середовища на створення в них звукових полів.

## Висновки до розділу 1

На основі аналізу фізичної моделі побудови кругових циліндричних гідроакустичних антен з екраном визначені їх конструктивні особливості, які впливають на формування фізичних полів таких типів антен. До них належать: розміри та параметри розміщення екрану відносно випромінювачів антени; розміри та параметри розміщення і включення випромінювачів в антені, антена може працювати в двох основних режимах випромінювання – одночасне випромінювання всіма

елементами антени або випромінення сектором; конструктивні особливості випромінювачів такі як: а) Поляризація активного елемента; б) марка п'єзокеарміки із якої створено активний елемент; в) конструкція випромінювача (силова або компенсована).

Згідно із розглянутою фізичною моделлю розроблені розрахункові моделі, для акустичних антен побудованих на основі випромінювачів як із радіальною, так і з круговою поляризацією. Ці розрахункові моделі враховують всі наведені вище особливості як циліндричних гідроакустичних антен з екраном, так і випромінювачів у їх складі.

Строгим методом «зв'язаних» полів була вирішена задача випромінення звуку круговою циліндричною гідроакустичною антеною яка складається з циліндричних випромінювачів та акустично м'якого екрану. Вона вирішена як для ситуації секціонованого випромінювача, тобто побудованого із активного матеріалу з круговою поляризацією, так і для суцільного, тобто, випромінювача з радіальною поляризацією. В результаті чого були отримані аналітичні співвідношення, що дозволяють отримати вирази для розрахунку характеристик акустичних, механічних та електричних полів випромінювача, що працює у складі антени з екраном.

## **РОЗДІЛ 2. ВЛАСТИВОСТІ МЕХАНІЧНИХ ПОЛІВ КРУГОВИХ ГІДРОАКУСТИЧНИХ АНТЕН З ЕКРАНАМИ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ОСОБЛИВОСТЕЙ КОНСТРУКТИВНОГО ВИКОНАННЯ АНТЕН ТА ЇХ ЕЛЕМЕНТІВ**

### **2.1 Параметри досліджуваних механічних полів**

Для задоволення потреб сучасних полімедійних акустичних технологій створена значна кількість електроакустичних приладів, які відрізняються способом перетворення енергії, формами коливань активних елементів і конструктивними особливостями. При цьому, саме від способу перетворення енергії залежить ефективність електромеханічного перетворення енергії. Формою коливань активного елемента в значній мірі визначаються резонансні розміри електроакустичного приладу, вид його характеристик направленості, узгодженість

перетворювача з середовищем і обумовлена ними ефективність механоакустичного перетворення енергії.

Відповідно до технічного завдання кожний електроакустичний прилад проектується для роботи з певними енергетичними можливостями протягом заданого терміну у визначених умовах експлуатації. Існує ряд фізичних факторів, які обмежують ці можливості при випромінюванні звуку: внутрішні фактори – динамічна механічна міцність, електрична міцність, нагрівання, і зовнішній фактор – явище кавітації. В зв'язку з цим, на кожний з елементів конструкції електроакустичного приладу діють певні навантаження.

Незалежно від типу конструкцій і форми коливань електроакустичних приладів до основних конструкційних вузлів, які визначають механічну міцність, відносять: активні елементи, їх кріплення до корпусів приладів, електричний монтаж активних елементів та корпуси електроакустичних приладів.

Це пояснюється тим, що міцність електроакустичного приладу визначається міцністю найслабкішого конструктивного вузла. Як показала практика, таким найслабкішим вузлом при механічному навантаженні електроакустичного приладу є його активний елемент з п'єзокераміки.

В процесі експлуатації конструкції електроакустичних приладів зазнають дію як статичних, так і динамічних (знакозмінних) навантажень. Статична міцність основних конструкцій вузлів та прилад в цілому характеризує їх властивість чинити опір руйнуванню через розрив матеріалу при дії сталих розтягуючих зусиль. Кількісною мірою статичної міцності є межа міцності – максимальне напруження розтягування  $\sigma_{cp}$ , яке конструкційний матеріал витримує. Особливість п'єзокерамічних та п'єземагнітних матеріалів полягає в тому, що їх міцність на стискування  $\left(\sigma_{cm} = (35 \div 50) \cdot 10^3 \text{ Н/см}^2\right)$  на порядок вища міцності на розтягування  $\left(\sigma_{pозт} = (1,7 \div 3) \cdot 10^3 \text{ Н/см}^2\right)$ , що обумовлено специфікою їх мікроструктури. Тому динамічні напруження, які виникають в активних елементах електроакустичних приладів, не повинні перевищувати відповідну межу  $\sigma_{cp}$ . Для збільшення динамічної міцності електроакустичних приладів в їх активних елементах створюють сталі

стискуючи напруження  $\sigma_{арм}$ , підсилюючи (армуючи) активні елементи міцнішим ніж п'єзокераміка матеріалом, наприклад, металом.

Для забезпечення міцності конструкцій електроакустичних приладів необхідно, щоб у всіх випадках робочі навантаження  $\sigma_{\Sigma}$ , що створюються всіма видами впливу, не перевищували руйнівних значень  $\sigma_{ep}$ , тобто,  $\sigma_{\Sigma} \leq \sigma_{ep}$ .

Більше того, для збільшення надійності рекомендується брати за основу співвідношення  $\sigma_{\Sigma}/\sigma_{ep} < 1$ . При цьому навантаження, що допускаються, звичайно вибираються з умови  $\sigma_{\Sigma доп} = \sigma_{ep}/K_3$ , де  $K_3$  – коефіцієнт запасу на надійність. У випадках невиконання умови  $\sigma_{\Sigma} \leq \sigma_{ep}$  виникає механічне руйнування перерахованих вище конструкційних вузлів, наслідком чого може бути зміна опору механічних втрат  $r_{ме}$ , зміна форми коливань активних елементів  $\omega_p$ , а також втрата стійкості конструкції.

Для обґрунтованого вибору типів конструкційних матеріалів та розмірів деталей конструкцій електроакустичних приладів необхідно знати кількісні характеристики конкретних навантажень, які діють на них.

Природно, що зовнішній тиск  $p_e$ , до якого зокрема відносять і тиск в рідинах, створює в елементах конструкцій електроакустичних приладів механічні напруження  $\sigma_e$ , які через наявність механічної трансформації в більшості випадків значно перевищують величину зовнішнього тиску  $\sigma_e \gg p_e$ . Навантаження такого типу відносяться до статичних.

Крім статичних механічних напружень, які утворюються в активних елементах електроакустичних приладів під дією зовнішнього тиску та армуючими елементами конструкцій, в цих елементах виникають динамічні напруження. До них відносяться напруження, які створюються при роботі електроакустичних приладів в режимі випромінювання звукової енергії при коливаннях їх активних елементів і є циклічно змінними. Величина механічних динамічних напружень, що визначає напружений стан активних елементів електроакустичних приладів, залежить від характеристик режиму випромінювання, конструктивного виконання електроакустичного приладу

та його вузла армування, характеру коливань, параметрів коливальної системи та технології складання приладу.

Очевидно, що чим більша питома акустична потужність, яку випромінює електроакустичний прилад, тим більші динамічні механічні напруження створюються в його активному елементі. [64]

Саме тому вивчення механічних полів при вирішенні задачі випромінення звуку акустичною антеною є дуже важливим. В той самий час, в класичній постановці задачі випромінювання звуку, коливальна швидкість на поверхні випромінюючих тіл є заданою. [62, 73] Такий підхід являється в значній мірі виправданим, коли розглядаються одиночні джерела звуку [17].

Більш правильним з фізичної точки зору є розв'язок наскрізної задачі випромінення звуку, коли заданим параметром є підведена збуджуюча напруга. Це дозволяє враховувати той факт, що коливальна швидкість на поверхні випромінювача залежить як від величини збуджуючої напруги, так і від зовнішнього оточуючого середовища.

При дослідженні механічних полів випромінювачів будемо виходити із необхідності знання амплітуд і фаз як механічних зміщень точок середовищ, так і їх коливальних швидкостей. При цьому оскільки введення до складу кругової циліндричної антени екрана порушує радіальну симетрію акустичного навантаження кругового циліндричного випромінювача, то аналізу підлягають як радіальні зміщення та коливальні швидкості, так і тангенціальні. Відповідні розрахункові вирази для їх визначення мають наступний вигляд:

– для радіальних  $w$  та тангенціальних  $u$  зміщень

$$w = \sum_n w_n e^{in\varphi}, \quad u = \sum_n u_n e^{in\varphi};$$

– для радіальних  $\frac{\partial w}{\partial t}$  і тангенціальних  $\frac{\partial u}{\partial t}$  коливальних швидкостей

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -i\omega w = -i\omega \sum_n w_n e^{in\varphi}; \quad \frac{\partial u}{\partial t} = -i\omega u = -i\omega \sum_n u_n e^{in\varphi}.$$



При цьому коефіцієнти  $w_n$  визначаються в результаті розв'язку методами редукції або послідовних наближень нескінченних систем лінійних алгебраїчних рівнянь виду (1.22) для випромінювачів з окружною поляризацією і виду (1.30) – для випромінювачів з радіальною поляризацією. Коефіцієнти  $u_n$  пов'язані з коефіцієнтами  $w_n$  співвідношенням (1.19). Для встановлення закономірностей поведінки властивостей механічних полів від особливостей конструктивного виконання циліндричної акустичної антени з екраном досліджувались частотні та кутові залежності амплітуд та фаз наведених параметрів цих полів та мод, з яких вони складаються, від:

- типу виконання конструкцій випромінювачів – силової чи компенсованої та фізичних характеристик середовищ, що заповнюють внутрішню порожнину випромінювачів;
- розмірів акустичного екрана;
- кількості випромінювачів в антені та геометрії їх розміщення (сектором або по всій окружності антени);
- складу застосованої в конструкції п'єзокераміки та характеру її поляризації;
- розмірів, діаметру та товщини п'єзокерамічної оболонки випромінювачів.

Розрахунки числових характеристик механічних полів проводились для наступних числових значень та конструктивних особливостей циліндричних акустичних антен з екраном та випромінювачів у їх складі.

З огляду на те, що у розрахункових виразах використовується п'єзоконстанти, їх значення визначаються з наведених у таблиці 2.1 значень п'єзomodулів за допомогою наступних співвідношень [3, 24]:

$$\begin{aligned} e_{33} &= d_{33} \cdot C_{33}^E, \\ e_{31} &= d_{31} \cdot C_{11}^E. \end{aligned}$$

Середні радіуси п'єзокерамічних оболонок та їх товщини змінювались відповідно в діапазонах  $r_{0s} = 0,068 \div 0,12$  м та  $h_s = 0,008 \div 0,012$  м. Кількість випромінювачів у складі антенної решітки змінювалась в діапазоні  $M = 3 \div 5$ .

Склад матеріалу п'єзокерамічної оболонки: ЦТБС-3, ЦТС-19, ТБК-3.

Характеристики матеріалів приведено в табл. 2.1

Таблиця 2.1

Параметр	Склад кераміки		
	ЦТБС-3	ЦТС-19	ТБК-3
Густина, $\rho_k, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	7210	7740	5400
П'єзомодуль, $d_{31}/d_{33} \cdot 10^{-12}, \frac{\text{Кл}}{\text{Н}}$	134/286	125/304	49/121
Модуль пружності, $C_{11}^E/C_{33}^E \cdot 10^{10}, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	15,1/13,6	10,9/9,3	15,7/15,3
Діелектрична проникність, $\varepsilon_{33}^S/\varepsilon_0$	1280	935	950

Кількість призм в оболонках з окружною поляризацією була прийнята рівною  $N = 48$ . Електрична напруга, якою збуджувався кожен з випромінювачів антенної решітки, становила  $\psi_0 = 200 \text{ В}$ . Внутрішні порожнини п'єзокерамічних оболонок випромінювачів вакуумувались ( $\rho_1 c_1 = 0$ ), заповнюватись повітрям при нормальному атмосферному тиску  $\left( \rho_1 c_1 = 419,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}} \right)$  або рідинами з різними густиною та швидкістю звуку  $\left( \rho_1 c_1 = 1,5 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}; 1,2 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}; 0,75 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}} \right)$ . Розміри акустичного екрану  $r_{2,N+1} = r_{0s}; 3 \cdot r_{0s}; 5 \cdot r_{0s}$ . Розглядався частотний діапазон  $f = 0 \div 20000 \text{ Гц}$ . Усі наведені частотні залежності зміщень та коливальних швидкостей розраховувались в точках на поверхні випромінювачів.

## 2.2 Властивості механічних полів кругових антен з екраном, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів силової конструкції

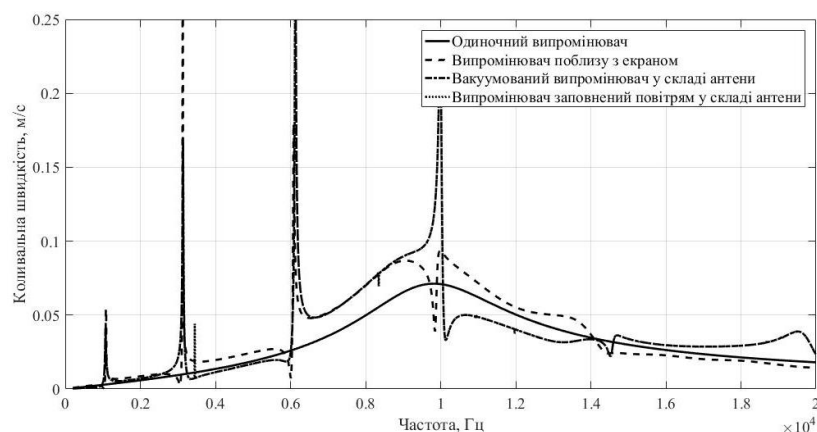
Як, вже було сказано в попередньому розділі суттєвим параметром будь-якого випромінювача є тип виконання його конструкції – силова або компенсована. Ці дві конструкції відрізняються між собою пружними характеристиками середовищ, що заповнюють його внутрішній об'єм. В силових конструкціях внутрішній об'єм випромінювача вакуумується, коли його імпеданс близький до нуля, або заповнюється повітрям або газом при нормальному атмосферному тиску, тобто для

нього також виконується умова, що імпеданс зовнішнього середовища навколо випромінювача значно більший за імпеданс середовища в середині випромінювача. Такий вид заповнення внутрішнього середовища випромінювача призводить до того, що його вплив на роботу випромінювача стає зовсім не значним.

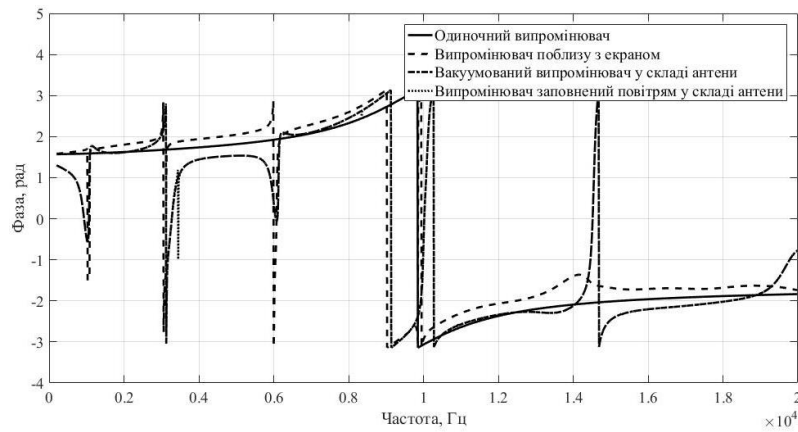
В компенсованих же конструкціях внутрішнє середовище випромінювача заповнюється середовищем, імпеданс якого близький до імпедансу середовища, що оточує випромінювач. Для води, наприклад, випромінювач заповнюється водою, маслом з імпедансом, близьким до імпедансу води, або газом під високим тиском. Завдяки цьому вплив внутрішнього середовища на роботу випромінювача стає досить суттєвим.

Розгляд почнемо із випромінювачів силової конструкції. В якості параметра механічного поля, який будемо вивчати для визначення кількісного впливу елементів антени на параметри механічного поля, обираємо частотні залежності коливальної швидкості та її фази на поверхні випромінювачів у складі антени та розподіл коливальної швидкості по поверхні випромінювачів на певних частотах.

Розрахунки будемо проводити для наступних параметрів антени – серединний радіус випромінювача – 0,068 м, товщина оболонки – 0,008 м, відстань між поверхнями екрана та випромінювачів – 0,005 м, радіус екрана – 0,072 м, випромінювачі розміщені рівномірно по колу навколо екрана або зведені в сектор –  $60^\circ$ , п'єзокераміка складу ЦТБС-3. Коливальна швидкість розраховується для точки на поверхні випромінювача, яка розташована в напрямку, протилежному напрямку на екран.



а)



б)

Рис. 2.1 Частотні залежності амплітуд (а) та фаз (б) радіальних коливальних швидкостей поверхні випромінювача в напрямку, протилежному екрану.

Вивчення частотних характеристик почнемо з ситуації, коли випромінювачі рівномірно розміщені по колу. Розділимо при аналізі частотних залежностей амплітуд та фаз коливальної швидкості (рис.2.1, а, б) всю область на три частотні області – низькочастотну ( $f < 8000 \text{ Гц}$ ), резонансну область ( $8000 < f < 12000 \text{ Гц}$ ) та область високих частот ( $f > 12000 \text{ Гц}$ ).

Дослідження частотних характеристик почнемо із області низьких частот. Ця область характеризується рядом суттєвих особливостей. Першою з них є те, що в цій області коливальна швидкість досить швидко зменшується із зменшенням частоти. Це пов'язано з тим, що зі зменшенням частоти швидко зростає власний механічний імпеданс п'єзокерамічної оболонки випромінювача, оскільки в цій області він має пружний характер, в той самий час імпеданс випромінювання падає, оскільки хвильовий розмір випромінювача зменшується.

Другою ж особливістю є виникнення в цій частотній області ряду нових додаткових резонансів. При цьому амплітуди цих резонансів, так само, зменшуються зі зменшенням частоти.

Третя особливість витікає із порівняння між собою кривих, що описують коливальну швидкість випромінювача без екрану, одиночного випромінювача, який розташований поблизу з екраном, та випромінювача у складі антени. Вона полягає в тому що, в цій області амплітуда коливальної швидкості на поверхні випромінювача у складі антени, поза резонансами, є навіть меншою, за амплітуду коливальної

швидкості одиночного випромінювача у тій самій області частот. В той самий час амплітуда коливань на поверхні одиночного випромінювача, розташованого поблизу з екраном, є значно більшою, за амплітуду коливань на поверхні одиночного випромінювача. Частоти резонансних викидів на поверхні одиночного випромінювача поблизу з екраном збігаються з частотами резонансних випромінювачів у складі системи, але для одиночного випромінювача поблизу з екраном ширина викидів є значно меншою ніж ширина викидів для випромінювачів у складі системи. Також амплітуди викидів у випромінювачів у складі антени є значно меншими, ніж у одиночного випромінювача, розташованого поблизу із екраном. Ці ефекти викликані саме взаємодією випромінювачів у складі антени.

Фазова характеристика коливальної швидкості на поверхні випромінювача в цій частотній області характеризується вузькосмуговими викидами, при чому частоти цих викидів відповідають резонансним викидам в частотній характеристиці амплітуд коливальної швидкості.

Область резонансу характеризується тим, що в ній власний механічний імпеданс випромінювача та його імпеданс випромінювання близькі між собою. Тому суттєвий вплив отримують реакція середовища на збудження в ній звукового поля та обмін хвилями між випромінювачами та між випромінювачами і екраном, в системі тіл, що розглядається.

Порівнюючи криві, представлені на рис.2.1, видно, що ця область дуже суттєво відрізняється для одиночного випромінювача, одиночного випромінювача поблизу з екраном та випромінювача у складі системи. Так, амплітуди коливань в цій області для випромінювачів як у складі системи, так і одиночного випромінювача поблизу з екраном є значно більшими, за амплітуду резонансу одиночного випромінювача, однак, частота основного резонансу перетворювача залишилася незмінною для всіх ситуацій.

Також, цікавим є те, що частотна характеристика коливальної швидкості для випромінювача, розташованого поблизу з екраном, та випромінювача у складі антени точно збігаються між собою. Але на частоті основного резонансу в частотній характеристиці одиночного випромінювача розташованого поблизу з екраном

відбувається провал амплітуди. В той самий час, частота викиду в характеристиці випромінювача у складі антени збігається із частотою викиду, що йде за провалом в характеристиці одиночного випромінювача, розташованого поблизу з екраном. Але для випромінювача у складі антени цей викид стає більш вузькосмуговим порівняно із викидом у одиночного випромінювача, розташованого поблизу з екраном.

Зміна фази на протилежну, яка відбувається у одиночного випромінювача на частоті резонансу, для випромінювача у складі антени та у випромінювача, розташованого поблизу з екраном, відбувається одночасно на частоті, що значно нижча за частоту зміни фази у одиночного випромінювача. На частоті ж, яка відповідає зміні фази у одиночного випромінювача, в фазовій характеристиці випромінювача, розташованого поблизу екрана, та у випромінювача у складі антени відбуваються вузькосмугові викиди.

Порівнюючи між собою криві, що відповідають амплітудним та фазовим характеристикам досліджуваних випромінювачів в області високих частот, видно, що ця область характеризується зовсім слабкою залежністю механічного поля випромінювача від екрану. Так, у одиночного випромінювача, розташованого поблизу із екраном, амплітуда коливань є нижчою за амплітуду коливань поверхні одиночного випромінювача. Це пов'язано зі збільшенням власного механічного імпедансу в цій смузі частот. Для випромінювача ж у складі антени в області високих частот амплітуда коливань зовсім мало перевищує амплітуду коливань одиночного випромінювача.

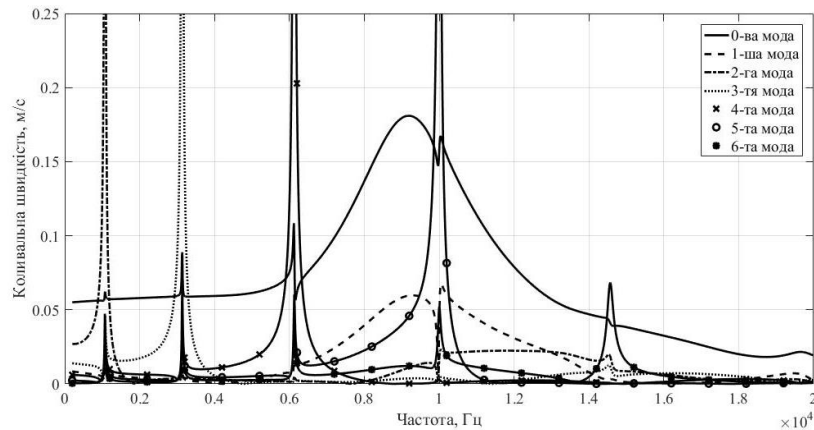
В фазовій же характеристиці відбувається вузькосмуговий викид на частоті, після якої амплітуда коливальної швидкості випромінювача у складі антени починає зростати, порівняно, із амплітудою коливальної швидкості одиночного випромінювача.

Окрім вакуумованих до силових конструкцій відносять також конструкції випромінювачів, внутрішнє середовище яких заповнене газом за нормального атмосферного тиску. В останньому випадку внутрішня порожнина випромінювача, яка представляє собою замкнутий об'єм з певними розмірами, являється резонуючою порожниною, тобто її вплив має проявитись в механічному полі

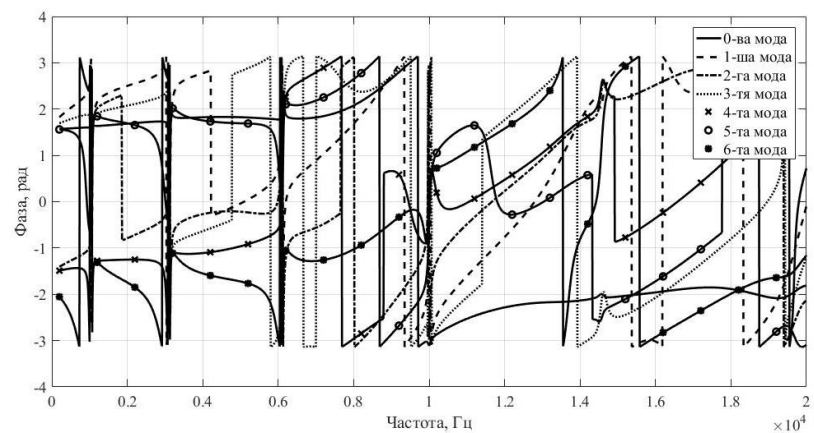
досліджуваної системи. Саме цей факт демонструють криві, представлені на рис.2.1 (а) та (б) пунктирними лініями. Їх аналіз та співставлення із кривими рис.2.1 (а) та (б), зображеними суцільними лініями, які відповідають вакуумованим перетворювачам, демонструє нам те, що заповнення внутрішньої порожнини перетворювача повітрям ще більше розширює та збагачує спектр власних частот досліджуваної системи. В той же час, як видно із графіків, резонансні області частот додаткових резонансів та резонансів, пов'язаних із внутрішнім об'ємом випромінювача, суттєво відрізняються між собою. Так, амплітуда вузькосмугового викиду, пов'язаного із резонансом внутрішньої області випромінювача, частота якого 3450 Гц, в 5 разів менша за амплітуду викиду, пов'язаного із взаємодією, обумовленою наявністю в зовнішньому середовищі випромінювача інших випромінювачів та екрану, що знаходиться на частоті 3130 Гц. Це обумовлено різною реакцією зовнішнього та внутрішнього середовищ на збудження в них звукових полів, пов'язаною із відмінністю фізичних характеристик цих середовищ. Зовнішнє середовище являється рідинним, тому воно більш сильно навантажує працюючий випромінювач. До того ж, це навантаження через присутність екрану та інших перетворювачів не являється радіально симетричним. Внутрішнє навантаження в 3500 разів менше і являється радіально симетричним. Тому, пов'язані з нею резонанси, по-перше, дуже вузькосмугові, і, по-друге, проявляються у всіх частотних областях.

Визначимо тепер фізичні причини виникнення виявлених вище особливостей в закономірностях формування механічного поля системи випромінювачів, що розглядається. Із фізичних міркувань ясно, що радіаційні навантаження циліндричного п'єзокерамічного випромінювача при його роботі у складі кругової антени та поза нею суттєво відрізняється не тільки за амплітудою, а і по кутовому розподіленню при одному і тому самому характері електричного збудження випромінювача. Одиночний циліндричний п'єзокерамічний випромінювач, який не входить до складу антени, за вибраного типу радіально симетричного електричного навантаження має радіально симетричне радіаційне навантаження. За цих умов в ньому збуджується тільки одна форма коливань – нульова мода та існує лише один

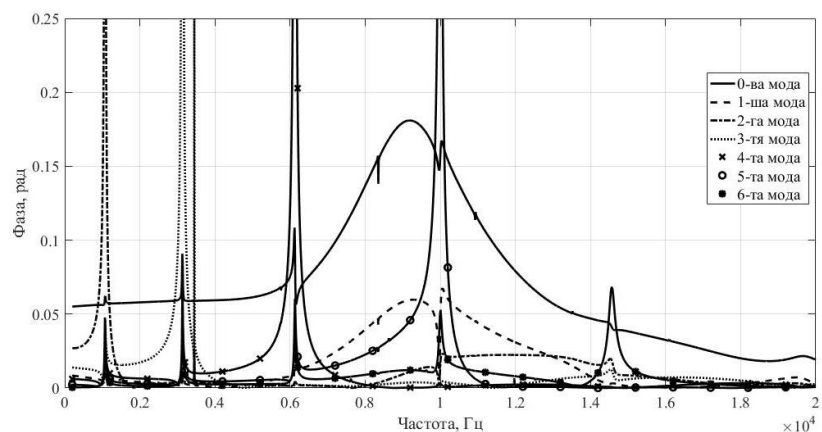
резонанс випромінювача. В антенній системі, що розглядається, радіальна симетрія випромінювача спотворюється через наявність екрану та інших так само працюючих випромінювачів. Враховуючи це, в системі з порушеною радіальною симетрією акустичного навантаження повинні з'явитися наступні моди коливань. Це підтверджується графіками рис.2.2, на якому представлені амплітуди (рис.2.2.(а, в)) та фази (рис.2.2.(б, г)) мод коливальної швидкості.



а)

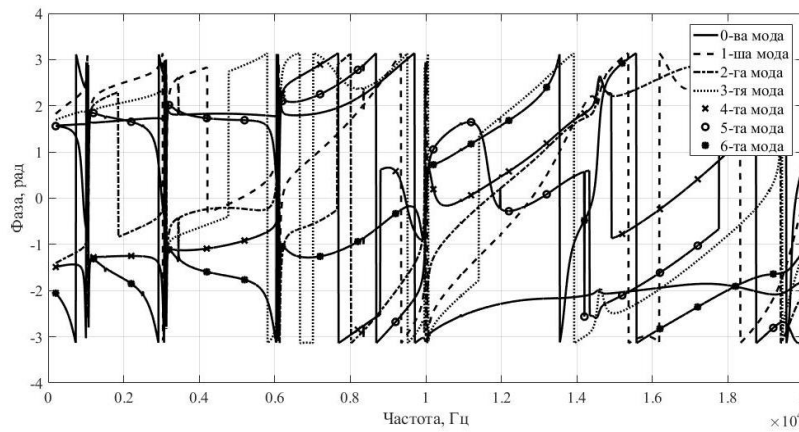


б)



в)





г)

Рис.2.2. Частотні залежності амплітуд (а, в) і фаз (б, г) мод коливальної швидкості вакуумованого (а, б) та заповненого повітрям за нормального атмосферного (в, г) тиску випромінювача

Аналіз приведених графіків демонструє той факт, що в досліджуваній системі виникає ряд наступних мод коливань, амплітуди коливальних швидкостей яких такі самі або більші за амплітуду коливальної швидкості нульової моди. Оскільки у випромінювач енергія «закачується» виключно на нульовій моді, то поява цих додаткових мод свідчить про те, що енергія ефективно перерозподіляється між наступними формами коливань оболонки.

Співставлення графіків рис.2.1. та 2.2 демонструє, що саме завдяки появі цих наступних форм коливань механічне поле системи тіл, що розглядається, стає багаторезонансним, а загальний рівень амплітуд коливальних швидкостей поза частотами резонансів відповідних мод коливань знижується. Так, саме через велику протилежність фаз та великі амплітуди нульової та п'ятої мод (рис.2.2.(б, г)) в області резонансу з'являється провал. Це пояснюється тим [7], що при зв'язаних повздовжньо-згинних коливаннях циліндричної оболонки для кожної моди коливання, починаючи з першої, існують дві власні частоти, що відповідають принципово різним напружено-деформованим станам оболонки і належать двом гілкам розв'язку дисперсійного рівняння – низькочастотній та високочастотній. Для низькочастотної гілки напруження в серединній поверхні оболонки малі. Для цієї гілки при заданому значенні  $h/r_0$  в досліджуваному діапазоні лежить декілька власних частот. В цьому випадку для всіх частот оболонки механічні імпеданси випромінювачів мають характер маси. Саме взаємодія маси оболонки, приєднаної

маси зовнішньої рідини і пружності п'єзокерамічної оболонки і об'єму рідини, що знаходиться в порожнині між екраном та випромінювачами, і створює передумови для появи в випромінювачах специфічних резонансів із відносно низькими частотами, що відсутні у власному спектрі частот оболонки випромінювача у вакуумі.

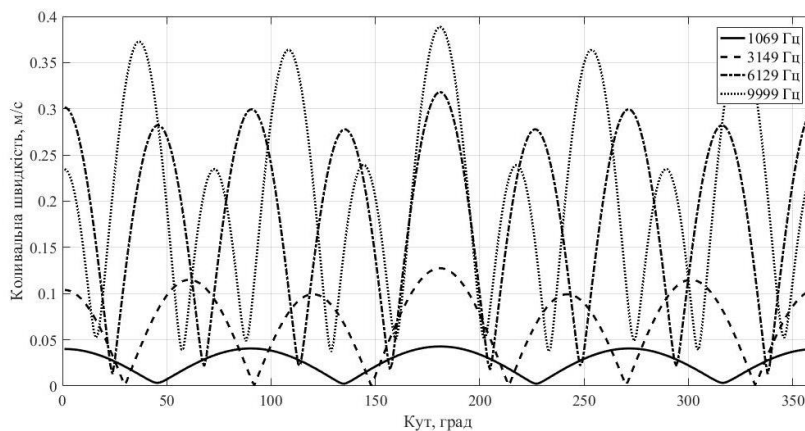
Високочастотна гілка коливань відповідає стану випромінювача із значними окружними напруженнями вздовж серединної поверхні і умові  $w \ll u$ . Частоти, які належать до верхньої гілки, лежать вище частоти нульової моди коливань оболонки випромінювача.

В області низьких частот, так само, як і для області резонансу і області високих частот, саме через виникнення нових мод коливань та через відмінність їх фаз, порівняно із фазою нульової моди на частотах, які знаходяться поза додатковими резонансами, амплітуда коливання поверхні випромінювача у складі антени є значно меншою за амплітуду коливань в цій частотній області одиночного випромінювача. На частотах же, де фази коливань відповідних мод співпадають із фазою коливань нульової моди, відбуваються вузькосмугові резонансні викиди.

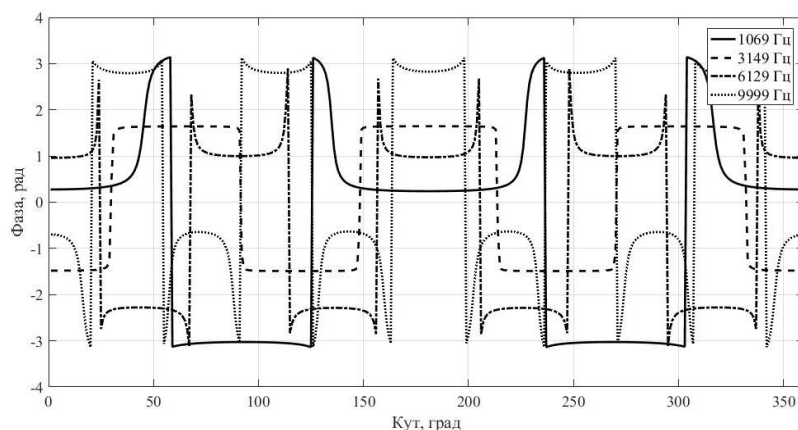
Проаналізуємо тепер кутове розподілення амплітуд та фаз коливальної швидкості на поверхні одного з випромінювачів у складі кругової антени з екраном на різних частотах (рис.2.3). Спільний розгляд кривих рис.2.1 та 2.3 дозволяє встановити ряд цікавих фактів. По-перше, кутові залежності амплітуд радіальних коливань точок на поверхні випромінювача на частотах додаткових резонансів відповідають модам коливань, що збуджуються на цих частотах. Так з рис. 2.2 а, видно, що частоті 1069 Гц відповідає друга мода коливань п'єзокерамічної оболонки випромінювача і на рис. 2.3 а кутове розподілення коливальної швидкості оболонки на цій же частоті відповідає формі другої моди коливань оболонки. Теж саме стосується і коливань на частотах резонансів третьої (3149 Гц), четвертої (6129 Гц) та п'ятої (9999 Гц) мод коливань оболонки.

Іншим цікавим фактом є те, що із ростом частоти збільшується вклад збільшується вклад екрану в формування розподілення коливальної швидкості на поверхні випромінювача. Так, порівнюючи амплітуду коливальної швидкості на

поверхні випромінювача в напрямку, протилежному екрану ( $\varphi = 0^\circ$ ), та амплітуду в напрямку на екран ( $\varphi = 180^\circ$ ) на частотах додаткових резонансів видно, що для



а)



б)

Рис.2.3 Кутові залежності амплітуд (а) та фаз (б) коливальних швидкостей поверхні вакуумованого випромінювача у складі антени

низьких частот вони мало відрізняються. Проте, з ростом частоти амплітуда коливань в напрямку на екран стає значно більшою за амплітуду коливань в протилежному екрану напрямку. Це пов'язано з тим, що коливальна швидкість на поверхні випромінювача зі сторони акустично-м'якого екрану досягає максимальних значень, оскільки акустичне навантаження випромінювачів з цих напрямків суттєво зменшується.

Проаналізуємо тепер кутовий розподіл амплітуд (рис.2.4 а) та фаз (рис.2.4. б) мод коливальної швидкості на поверхні випромінювача поза резонансами. Аналіз кривих рис. 2.4 показує, що, як і очікувалось, виходячи з кривих рис. 2.1, в низькочастотній області амплітуди і фази цих мод відповідають класичним нормам

своїєї поведінки. Особливість полягає в перевазі амплітуд швидкості коливань нульової моди над іншими при всіх кутах спостереження. Однак, сумарне поле все одно відрізняється від поля випромінювача на нульовій моді коливань, тому що в ньому збуджуються додаткові моди коливань, хоча проявляються вони і не так сильно, як на частотах додаткових резонансів.

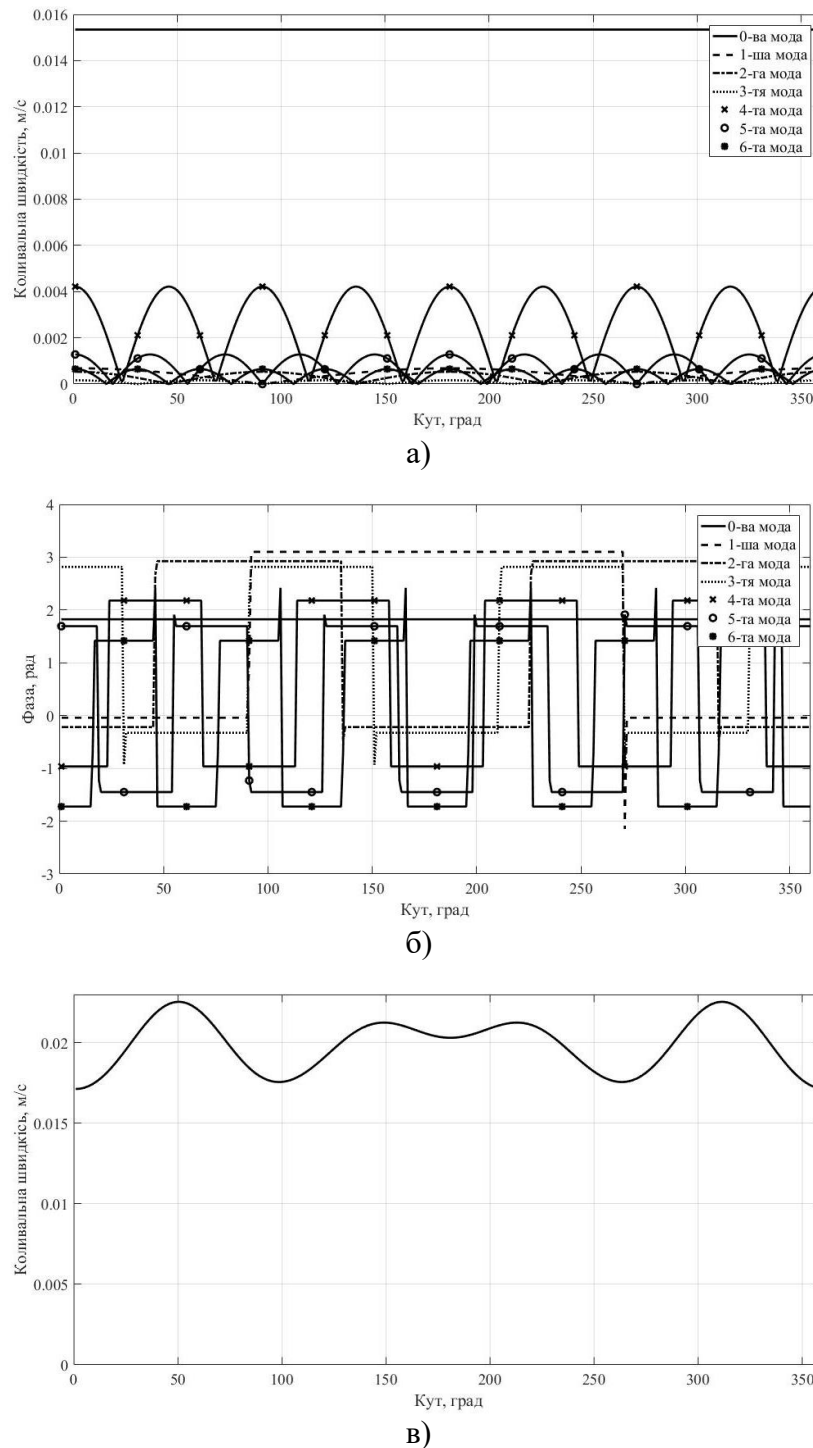
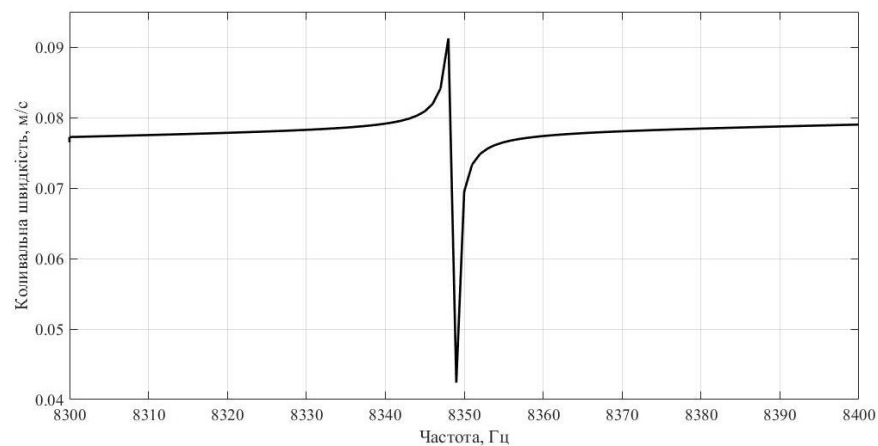


Рис.2.4 Кутові залежності амплітуд (а) та фаз (б) коливальних швидкостей мод та амплітуди (в) повних коливальних швидкостей поверхні п'єзокерамічної оболонки вакуумованого випромінювача на частоті  $f = 5000 \text{ Гц}$

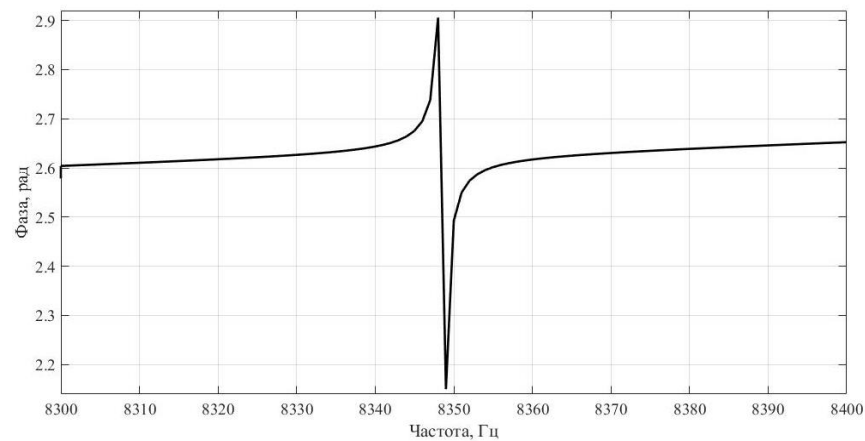
Розглянемо тепер механічні поля, які формуються циліндричним п'єзокерамічним випромінювачем у складі досліджуваної системи, внутрішня порожнина якого не вакуумована, а заповнена газом, наприклад, повітрям, за нормального атмосферного тиску. Така конструкція є ще одним різновидом випромінювача силової конструкції. Різниця між такою конструкцією та конструкцією випромінювача, внутрішнє середовище якого вакуумоване, полягає в тому, що тепер внутрішня порожнина випромінювача заповнена пружним середовищем, в якому можуть розповсюджуватися звукові хвилі. Тому, в такому випадку, випромінення звуку оболонкою відбувається не тільки у зовнішній простір, а і в замкнутий об'єм в середині випромінювача, що і відображається на властивостях механічних полів випромінювача (рис. 2.1).

Порівняння частотних залежностей амплітуд (рис.2.1 а) та фаз (рис.2.1 б) коливальних швидкостей вакуумованих випромінювачів та випромінювачів, заповнених повітрям дозволяє встановити наступне. Загальний хід частотних залежностей коливальних швидкостей силових конструкцій циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з різним заповненням внутрішньої порожнини повністю ідентичних як по фазі, так і по амплітуді. Генерація енергетично активних мод і обумовлені ними резонанси зберігаються повністю у всьому частотному діапазоні. Заповнення внутрішньої порожнини випромінювача пружним середовищем у вигляді газу призводить до подальшого розширення спектру власних резонансних частот випромінювача, які викликані резонансами внутрішнього середовища випромінювача. На відміну від додаткових резонансів, сформованих енергетично-активними модами, які генеруються завдяки порушенню радіальної симетрії акустичного навантаження випромінювача зовнішнім середовищем, нові резонанси, викликані наявністю пружного середовища у внутрішній порожнині випромінювача, формуються при радіально симетричному навантаженні і являються вузькосмуговими. Порівнюючи криві, представлені на рис.2.5. (а) та 2.5 (в), видно, що ширина резонансного викиду, викликаного заповненням внутрішнього середовища, приблизно в 40 разів вужча за ширину викиду, викликаного наявністю в зовнішньому середовищі випромінювача інших випромінювачів та екрану. В

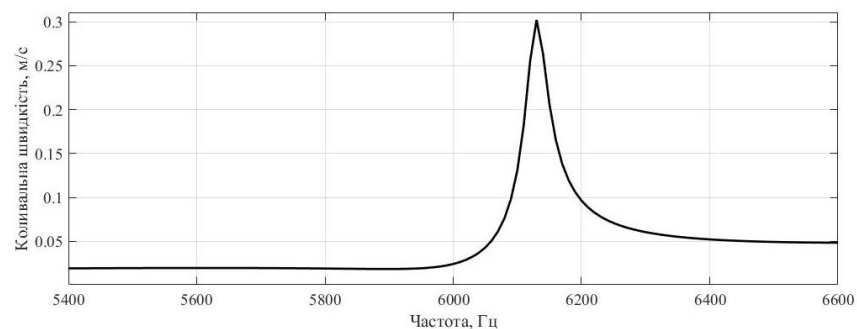
першому випадку ширина смуги викиду складає близько 5 Гц, а в другому – близько 200 Гц. Така вузька смуга частот викидів в першому випадку практично ускладнює можливість використання перетворювача на цій частоті, на відміну від, другого типу викидів, смуга якого є досить великою, що забезпечує можливість використання її на практиці. Відмінність резонансних смуг частот додаткових резонансів, викликаних несиметричністю навантаження оболонки та наявністю пружного середовища у внутрішній порожнині випромінювача, пояснюється суттєвою відмінністю імпедансів навантаження з боку



а)



б)



в)

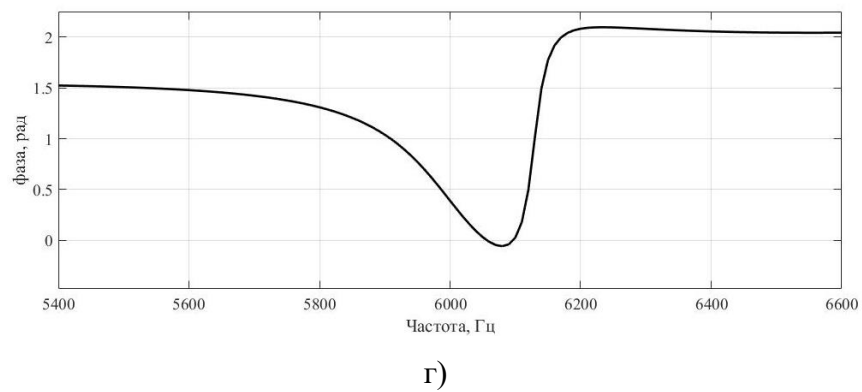
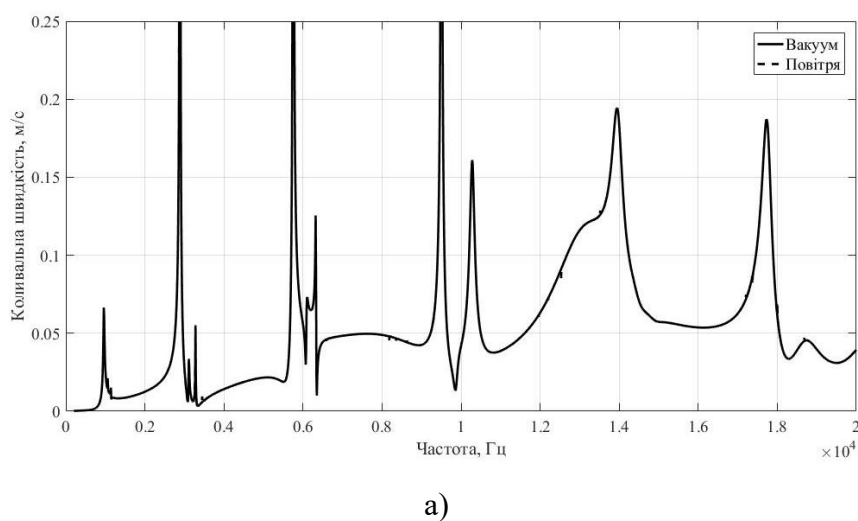
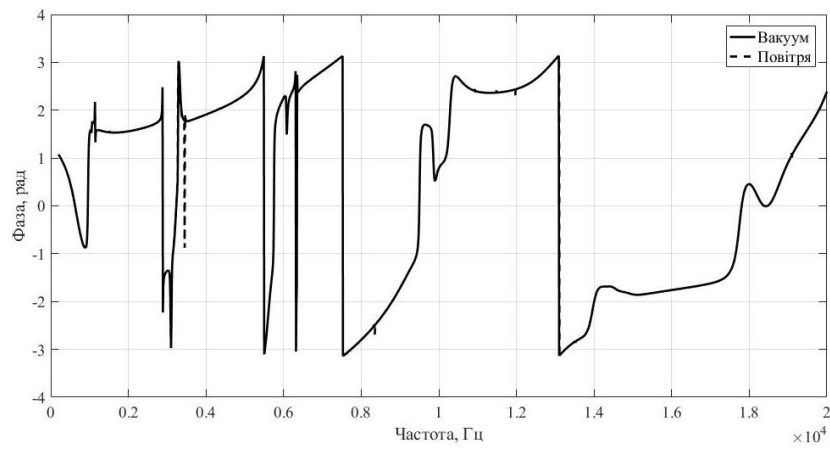


Рис.2.5 Частотна залежність амплітуди (а, в) та фази (б, г) коливальної швидкості поверхні заповненого повітрям випромінювача в області одного з нових резонансів викликаного заповненням внутрішнього середовища повітрям (а, б) та викликаного наявністю інших випромінювачів та екрану ззовні перетворювача відповідно (в, г).

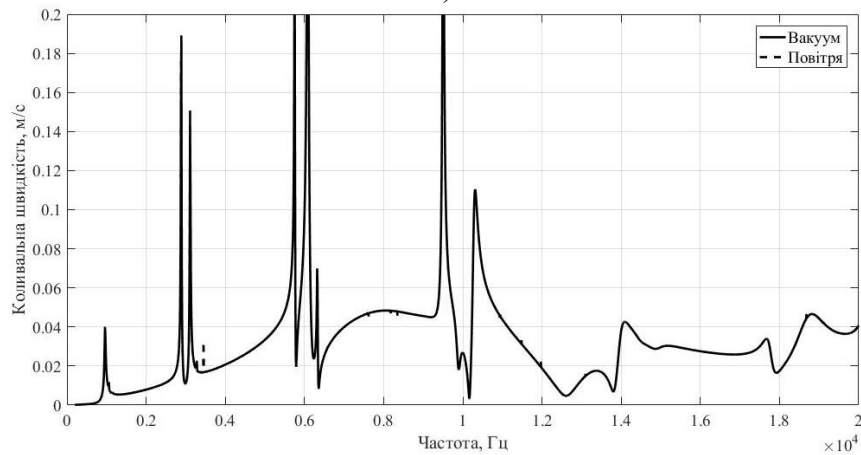
зовнішнього та внутрішнього середовищ. Так, хвильовий опір повітря за нормального атмосферного тиску в 3500 разів менший за хвильовий опір води.

Випромінювачі у складі кругових антен з екраном можуть розміщуватися або рівномірно, що і розглядалося вище, або можуть бути зведені у певний сектор. В цьому випадку вплив випромінювачів один на одного значно збільшується, оскільки відстані між ними суттєво зменшуються порівняно із ситуацією рівномірного розміщення. Тому далі розглянемо ситуацію, коли випромінювачі досліджуваної антени зведені в сектор  $60^\circ$ . Відстані між поверхнями елементів антени дорівнюють 5 мм.

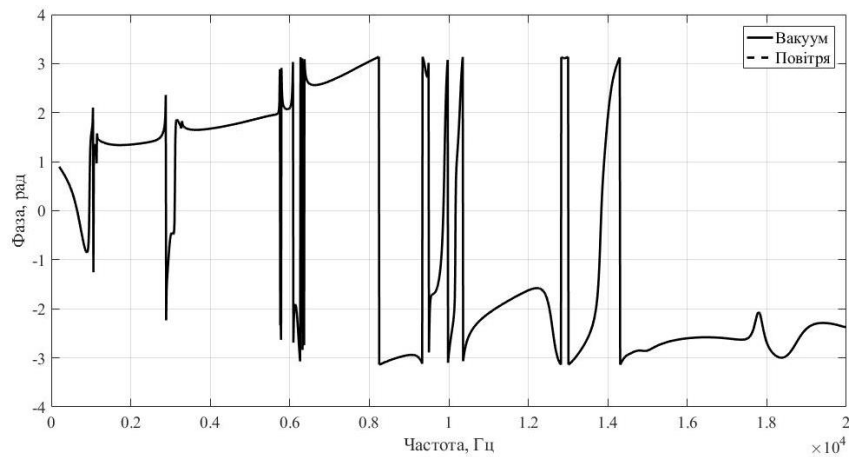




б)



в)



г)

Рис.2.6 Амплітуди (а, в) та фази (б, г) коливальних швидкостей на поверхнях випромінювачів у складі антени для центрального випромінювача (а, б) та для випромінювачів, що знаходяться по краях (в, г).

Як видно з рис. 2.6, так само як і для випромінювачів, які розміщені рівномірно навколо екрану, так і для ситуації, коли вони розміщені в секторі, через порушення радіальної симетрії акустичного навантаження випромінювачів антени коливальна



швидкість на поверхні випромінювачів стає багаторезонансною. Як і для системи з рівномірним розміщенням випромінювачів, частотну область досліджуваної системи можна розділити на 3 частотні області – область низьких частот ( $f < 8000 \text{ Гц}$ ), область резонансу ( $8000 < f < 12000 \text{ Гц}$ ) і область високих частот ( $f > 12000 \text{ Гц}$ ).

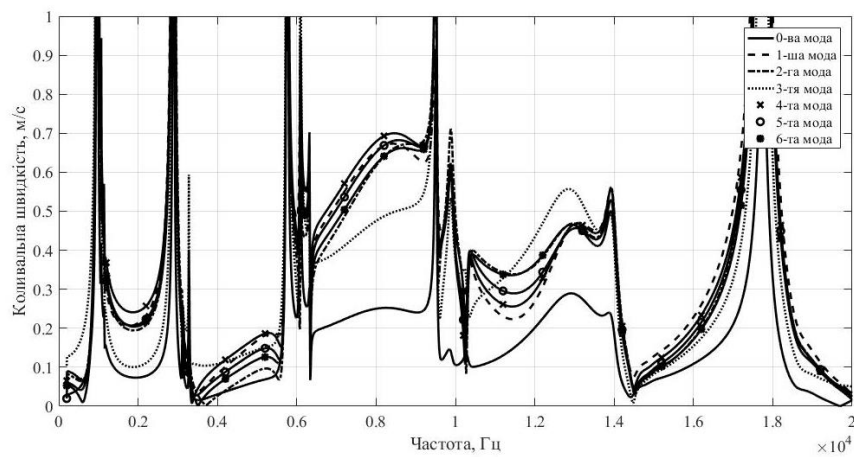
Дослідження частотної характеристики коливальної швидкості на поверхні випромінювачів почнемо із області низьких частот. Порівнюючи графіки, представлені на рис.2.1 (а) та рис.2.6 (а, в), бачимо, що в цій частотній області загальні риси кривих, що відповідають коливальним швидкостям на поверхні перетворювачів, є дуже схожими. Однак для випромінювачів, що працюють в секторній антені (рис.2.6 а, в) частотна характеристика має значно більше викидів порівняно із частотними характеристиками для кругової антени, представленими на рис.2.1 (а). Цікавим є те, що амплітуди коливань додаткових резонансів як для центрального, так і для крайніх перетворювачів решітки є більшими за амплітуди коливань поверхні випромінювачів при рівномірному розміщенні випромінювачів. Найбільші амплітуди досягаються на центральному випромінювачі на частотах, на яких фази коливань випромінювачів співпадають, за рахунок чого відбувається підсилення коливань. В частотній характеристиці крайніх перетворювачів порівняно із частотною характеристикою центрального випромінювача, більшість резонансних викидів мають значно меншу амплітуду коливальної швидкості порівняно із амплітудою швидкості коливань поверхні центрального випромінювача.

Розглянемо тепер область резонансу. В цій області частотні характеристики коливальної швидкості поверхні випромінювачів дуже суттєво відрізняються від частотної характеристики випромінювачів у складі решітки при рівномірному розміщенні. Так, для ситуації секторного випромінювання частотна характеристика розділяється на дві частини, причому амплітуди викидів в обох частинах є досить великими. В той самий час фази цих викидів є протилежними.

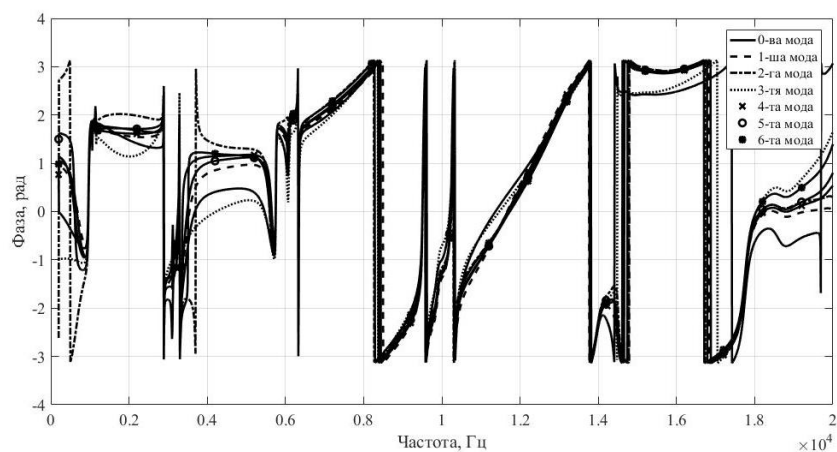
В області високих частот, в свою чергу, на поверхні центрального випромінювача також виникають додаткові резонансні піки, які взагалі відсутні у випромінювачів при рівномірному розміщенні випромінювачів. В той же час

частотна характеристика коливальної швидкості поверхні крайніх випромінювачів в цій частотній області залишається такою самою, як і для випромінювачів при їх рівномірному розміщенні.

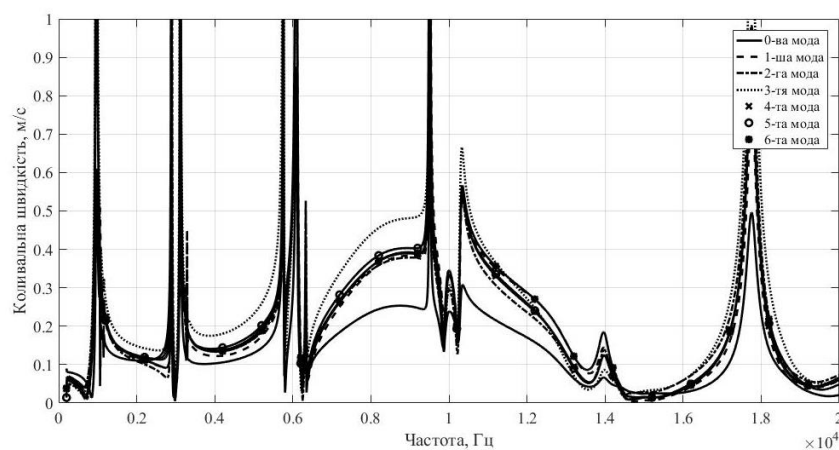
Так само як і для випромінювачів при рівномірному розміщенні, при заповненні внутрішнього середовища випромінювача пружним середовищем, в системі виникають додаткові вузькосмугові резонанси, які точно співпадають із резонансами, викликаними заповненням внутрішнього простору пружним середовищем для випромінювачів у складі системи з рівномірним розміщенням випромінювачів, оскільки вони залежать виключно від розмірів внутрішнього середовища випромінювача. Але, для ситуації секторного випромінювання наявність цих додаткових резонансів не є суттєвою, тому що їх амплітуди, порівняно із амплітудами коливань викликаними взаємодією випромінювачів між собою по акустичному полю та підсиленими амплітудами коливань, викликаних акустичною взаємодією між випромінювачами та екранами, є нехтовно малими.



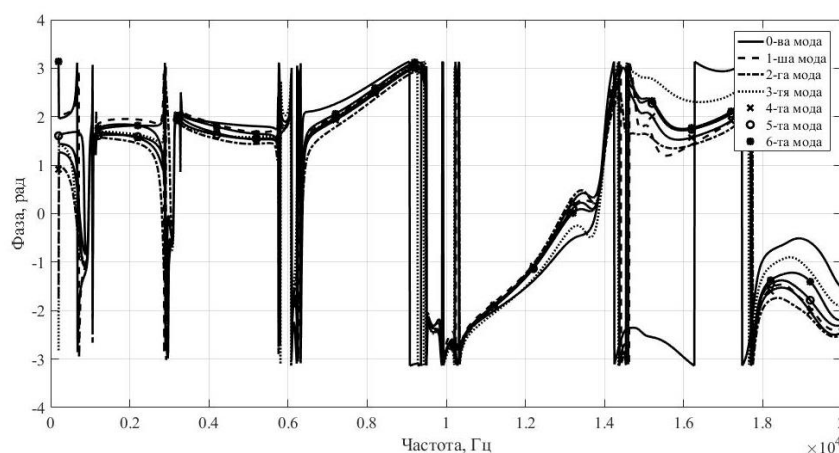
а)



б)



в)



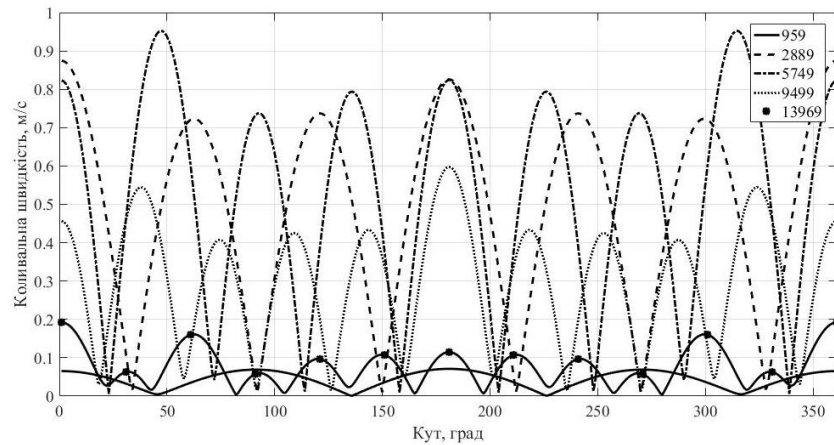
г)

Рис.2.7 Частотні залежності амплітуд (а, в) та фаз (б, г) мод коливальної швидкості на поверхні середнього (а, б) та крайніх (в, г) випромінювачів, що працюють у складі досліджуваної антени

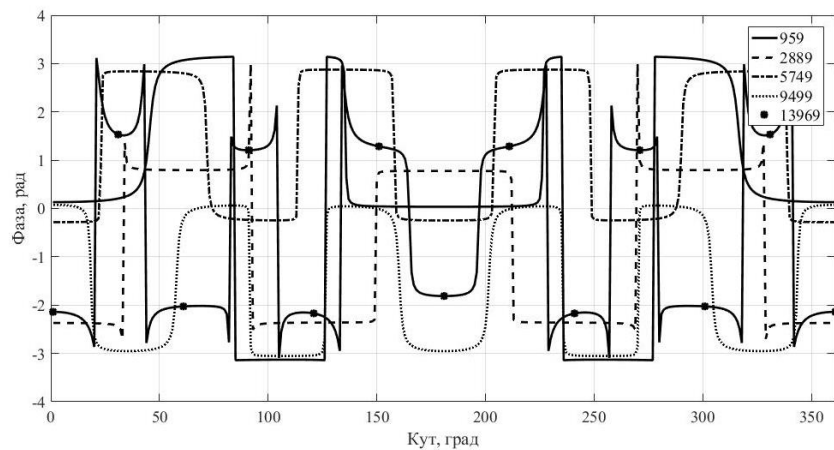
Дослідимо тепер розподілення коливальної швидкості поверхонь випромінювачів по модам коливань. Так само як і для попередньої ситуації, присутність екрану та випромінювачів, розміщених близько один від одного, призводить до порушення радіальної симетрії акустичного навантаження випромінювача при секторному випромінненні кругової антени, наслідком чого стає ефективний перерозподіл енергії нульової моди коливань, на якій відбувається збудження перетворювачів, що і демонструється на рис. 2.7. Так само, як і для випромінювачів при їх рівномірному розміщенні у складі решітки, резонансні викиди та провали поза ними формуються завдяки співпадінню або протилежності фаз мод коливань на певних частотах. Яскравим прикладом є відсутність викидів в області високих частот у крайніх випромінювачів, хоча в цій області і збуджуються

наступні, після нульової, моди коливань. В сумарному полі викиди відсутні через протилежність фаз коливань цих мод.

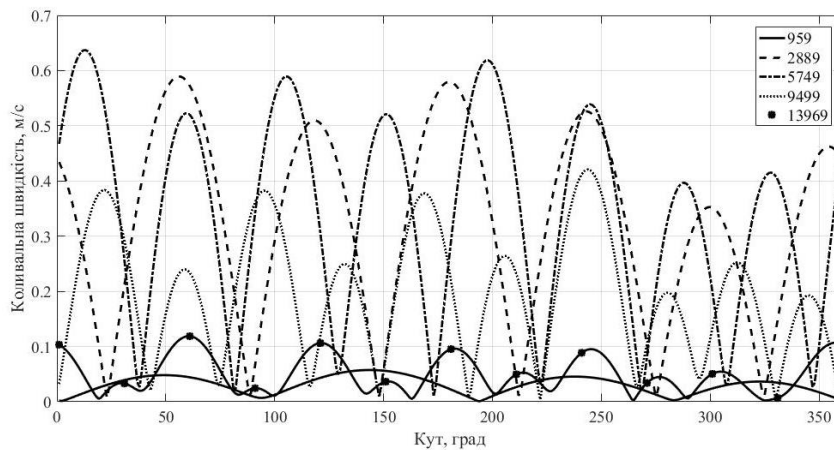
Розглянемо тепер розподіл коливальної швидкості по поверхні випромінювачів на частотах додаткових резонансів (рис.2.8).



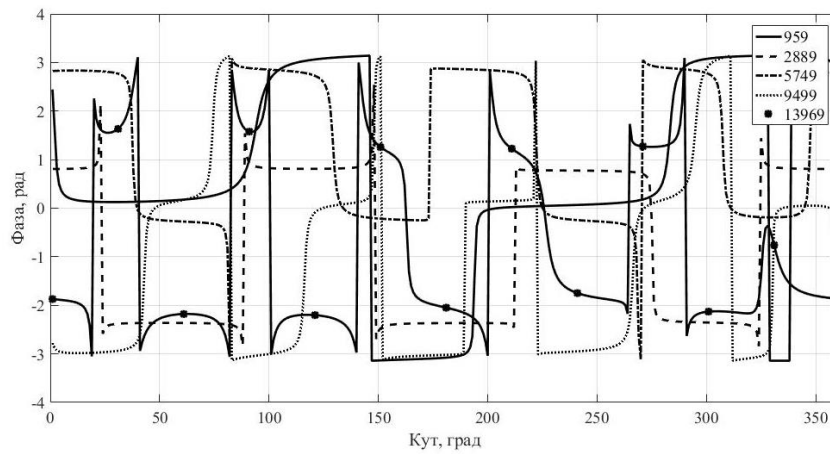
а)



б)



в)



г)

Рис.2.8. Кутові залежності амплітуд(а, в) та фаз (б, г) коливальної швидкості на поверхні центрального (а, б) та одного із бокових (в, г) випромінювачів досліджуваної системи

З аналізу кривих рис.2.8. видно, що так само як і для антени з рівномірним розміщенням випромінювачів, для секторного режиму випромінення кутові розподіли на частотах додаткових резонансів відповідають певним модам коливань, так коливання на частоті 959 Гц, як для центрального так і для бокового випромінювача відповідають другій моді коливань. Теж саме зберігається і для подальших мод коливань. Іншим цікавим фактом є те, що із ростом частоти, збільшується вплив акустичного екрану на акустичне поле випромінювача, так само, як і для антени із рівномірним розміщенням.

### 2.3 Властивості механічних полів кругових антен з екраном, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів компенсованої конструкції.

Як було сказано в попередньому параграфі, однією з головних характеристик будь-якого випромінювача є тип його конструктивного виконання – силовий або компенсований. Вони відрізняються між собою тим, що, в першому випадку, внутрішній об'єм випромінювача вакуумується або заповнюється повітрям за нормального атмосферного тиску. Такий тип конструкції застосовується у випромінювачах, що працюють на глибинах до 500 метрів. Цей тип конструктивного виконання та його вплив на механічне поле перетворювача розглядався в попередньому параграфі.

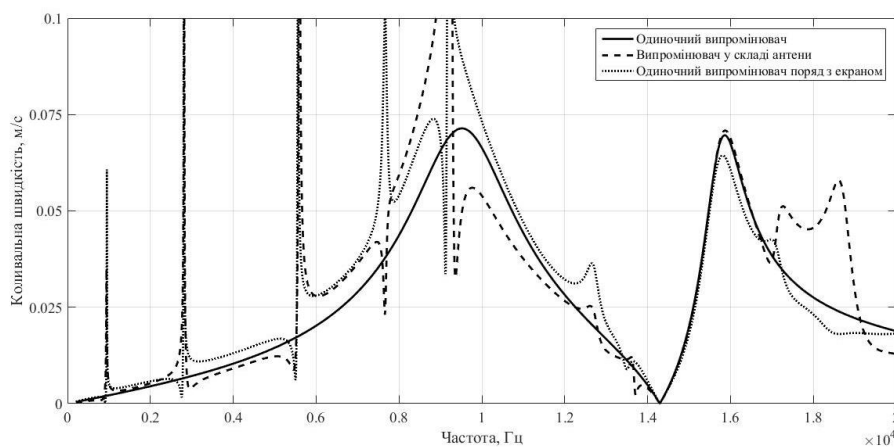
Компенсована ж конструкція, в свою чергу, характеризується тим, що в цьому випадку внутрішній об'єм випромінювача заповнюється пружним середовищем,

хвильовий опір якого близький до хвильового опору робочого середовища випромінювача. В якості середовища, яким заповнюють внутрішній об'єм випромінювача для ситуації, коли випромінювач працює у воді, може виступати вода, масло, газ під високим тиском. На відміну від силової конструкції внутрішнє середовище суттєво впливає на роботу випромінювача.

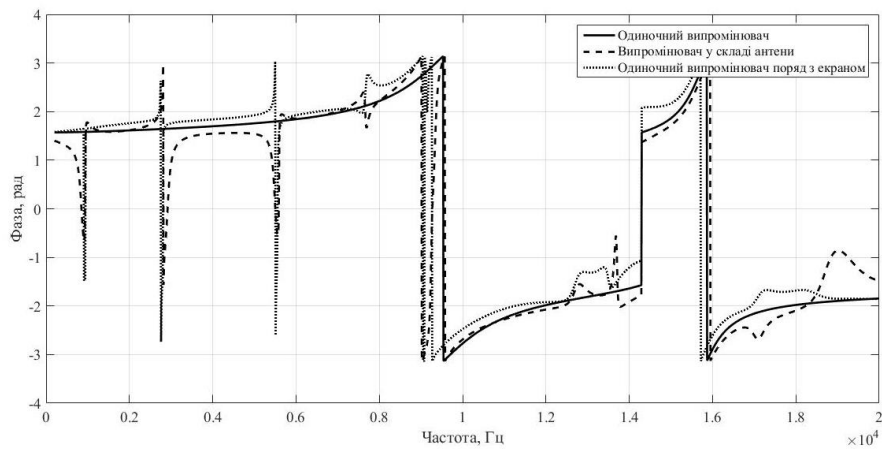
В якості параметра механічного поля, який будемо вивчати для визначення кількісного впливу елементів антени на параметри механічного поля, були обрані частотні залежності коливальної швидкості та її фази на поверхні випромінювачів у складі антени та розподіл коливальної швидкості по поверхні випромінювачів на певних частотах.

Розрахунки будемо проводити для наступних параметрів антени – серединний радіус випромінювачів 0,068 м, товщина оболонки 0,008 м, відстань між екраном та випромінювачами 0,005 м, радіус екрана 0,072 м, випромінювачі розміщені рівномірно по колу навколо екрану або зведені в сектор  $60^\circ$ , п'єзокераміка складу ЦТБС-3.

Вивчення частотних характеристик механічних полів антени почнемо з ситуації, коли випромінювачі рівномірно розміщені по колу. На рис.2.10 представлені криві, що характеризують розподіл коливальної швидкості на поверхні одиночного випромінювача, випромінювача, що знаходиться у складі антени та і одиночного випромінювача, розміщеного поряд з екраном.



а)



б)

Рис.2.9. Частотна залежність амплітуди (а) та фази (б) коливальної швидкості на поверхні випромінювача

Розділимо досліджувану смугу частот на три частотні області – низькочастотну ( $f < 8000 \text{ Гц}$ ), область резонансу ( $8000 < f < 12000 \text{ Гц}$ ) та область високих частот ( $f > 12000 \text{ Гц}$ ).

Аналіз частотних характеристик почнемо із області низьких частот. Поведінка кривих демонструє, що в цій області частотна характеристика характеризується декількома цікавими особливостями. Першою особливістю є те, що криві амплітуд для всіх трьох випадків спадають зі зменшенням частоти (рис. 2.9 а). Це пов'язано з тим, що зі зменшенням частоти швидко зростає власний механічний імпеданс п'єзокерамічної оболонки випромінювача, оскільки в цій області він має пружний характер. В той самий час імпеданс випромінювання падає, оскільки хвильовий розмір випромінювача зменшується. Другою особливістю є те, що в частотній характеристиці випромінювача, що знаходиться у складі антени і у одиночного випромінювача, який розміщений поблизу з екраном, на відміну від частотної характеристики одиночного випромінювача виникає ряд вузькосмугових резонансів, амплітуди яких значно перевищують амплітуду характеристики одиночного випромінювача в цій області та амплітуду основного резонансу випромінювача. При цьому амплітуди викидів у одиночного випромінювача, розміщеного поблизу з екраном, значно перевищують амплітуди викидів в характеристиці у випромінювача, що знаходиться у складі антени, і є більш вузькосмуговими. Частоти цих викидів для випромінювача у складі антени та для одиночного

випромінювача, розміщеного поблизу з екраном, точно співпадають між собою. Третьою особливістю є те, що амплітуди кривих поза вузькосмуговими резонансами для ситуації, коли випромінювач розміщений поблизу з екраном і коли він знаходиться у складі антени, ведуть себе по різному. Так, коли випромінювач розміщений у складі антени, амплітуда кривої менша за амплітуду одиночного випромінювача, в той самий час амплітуда кривої, яка відповідає одиночному випромінювачу, розміщеному поблизу з екраном, є більшою за амплітуду коливальної швидкості поверхні одиночного випромінювача. Ці ефекти пов'язані з тим, що, коли випромінювач працює у складі антени, то на нього починають впливати інші випромінювачі, і через те, що вони знаходяться на певній відстані, значно більшій ніж відстань між випромінювачами і екраном, фаза коливань в хвилі встигає змінитися і випромінювачі починають негативно впливати один на одного.

Фазова характеристика коливань, приведена на рис.2.9 б, демонструє, що в ній, так само як і в амплітудній характеристиці, для одиночного випромінювача, розміщеного поблизу з екраном, та і для випромінювача у складі антени, виникають вузькосмугові викиди, що відповідають викидам в амплітудній характеристиці. При цьому, в фазовій характеристиці зберігається встановлена вище особливість яка полягає в тому, що у одиночного випромінювача, розміщеного поблизу з екраном, ширина цих викидів є значно вужчою порівняно із шириною викидів у випромінювача, розміщеного у складі антени. Іншим цікавим фактом, є те що фазова характеристика одиночного випромінювача, розміщеного у складі антени, не повертається до свого початкового значення, на відміну від фазової характеристики одиночного випромінювача, у якого вона повертається до свого початкового значення після кожного із викидів.

Взагалі, порівнюючи криві, що відповідають одиночному випромінювачу, розміщеному поблизу з екраном, і випромінювачу у складі кругової антени, видно, що для ситуації, коли випромінювач знаходиться у складі такої антени, викиди в частотних характеристиках є значно більш згладженими та більш ширококутовими, що спрощує використання цих ефектів на практиці.



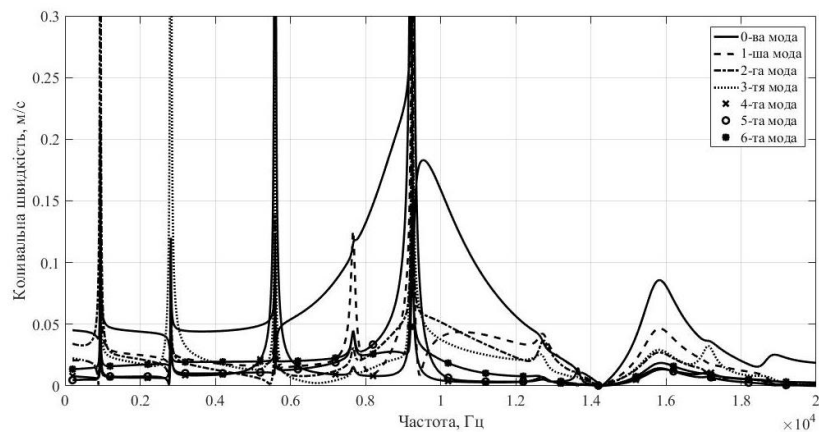
Далі переходимо до області резонансу. В цій області частотні характеристики для всіх трьох випадків дуже сильно відрізняються між собою і вона так само, як і область низьких частот, супроводжується виникненням ряду цікавих особливостей. Розглянемо кожну з них. Першою особливістю є те, що в цій області, так само, як і в області низьких частот, виникають додаткові, порівняно із частотною характеристикою одиночного випромінювача, резонансні викиди, амплітуди яких, в деяких випадках, значно перевищують амплітуду коливань одиночного випромінювача. Другою особливістю є те, що в цій області випромінювач у складі антени та одиночний випромінювач, розміщений поблизу з екраном, ведуть себе дуже по різному. Це видно як із амплітудної, так і з фазової характеристик коливань. Проявляється ця особливість в тому, що в деяких місцях, наприклад, на частоті 7960 Гц, на амплітудній характеристиці одиночного випромінювача, розміщеного поряд з екраном, є вузькосмуговий резонанс, амплітуда, якого значно перевищує амплітуду основного резонансу випромінювача. В той же час на тій же частоті в частотній характеристиці випромінювача у складі антени, відбувається широкосмуговий суттєвий провал амплітуди. Фаза на цій самій частоті також веде себе протилежним чином відносно фази коливань одиночного випромінювача. Така ж ситуація має місце і на більш високих частотах за головним резонансом одиночного випромінювача. Третьою особливістю є те, що загальний рівень коливань поза вузькосмуговими резонансами для випромінювача у складі антени та для випромінювача, розміщеного поблизу із екраном, значно вищий за рівень коливань у одиночного випромінювача. Четвертою, і, напевне, самою головною особливістю області резонансних частот є те, що основний резонанс одиночного випромінювача для одиночного випромінювача, розміщеного поряд із екраном, і для випромінювача у складі антени розділяється на дві частини. При цьому, на частоті основного резонансу знаходяться резонансні викиди як для випромінювача у складі антени, так і для одиночного випромінювача, розміщеного поблизу з екраном. Ці резонансні викиди, в свою чергу супроводжуються глибокими провалами, що знаходяться в околі основного резонансу одиночного випромінювача. Крім того, викиди частотної

характеристики у одиночного перетворювача, розміщеного поблизу з екраном, та у випромінювача, що входить до складу антени, ведуть себе протилежно.

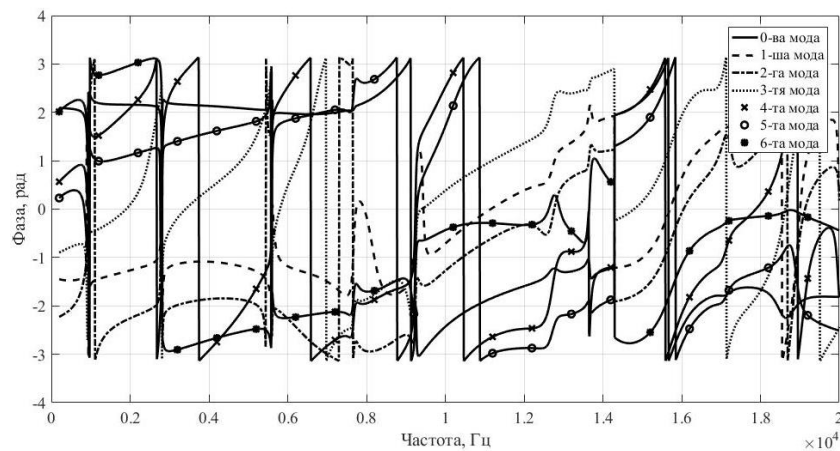
Тепер розглянемо область високих частот. В цій області у одиночного випромінювача відбувається спад амплітуди коливань, що пов'язано зі збільшенням власного механічного імпедансу в цій смузі частот. Порівнюючи криву, що відповідає одиночному перетворювачу, і криву, що відповідає одиночному перетворювачу, розташованому поблизу з екраном, видно, що механічні характеристики системи майже не змінюються під дією екрану, розташованого поблизу з випромінювачем. Фазові характеристики для цих двох ситуацій, якщо не враховувати невеликі викиди в характеристиці випромінювача, розміщеного поряд з екраном, майже збігаються. В той самий час в частотній характеристиці випромінювача в цій області, який входить до складу антени, виникають два широкосмугові викиди, рівень яких значно перевищує рівень амплітуди коливань в цій області. В фазовій характеристиці ці викиди характеризуються незначною зміною фази відносно фази одиночного випромінювача.

Визначимо тепер фізичні причини появи описаних вище явищ, що виникають в механічних полях досліджуваної кругової антени з екраном. Із фізичних міркувань ясно, що радіаційні навантаження циліндричного п'єзокерамічного випромінювача при його роботі у складі антени та поза нею відрізняються по кутовому розподіленню за умови однакового характеру електричного збудження випромінювача. Одиночний циліндричний п'єзокерамічний випромінювач, що не входить до складу антени, при обраному типі радіально симетричного електричного навантаження має радіально симетричне радіаційне навантаження. За цих умов в ньому збуджується тільки одна форма коливань – нульова мода і існує лише один резонанс випромінювача. В ситуації ж, коли ми вносимо випромінювач до складу кругової антени, радіальна симетрія радіаційного навантаження порушується через наявність розміщених поблизу нього екрану та інших працюючих випромінювачів. При цьому наявність інших працюючих випромінювачів має дуже суттєвий вплив на формування механічного поля перетворювача. Це видно із порівняння механічного поля одиночного випромінювача, розміщеного поряд з екраном, та механічного поля

випромінювача, який входить до складу антени. Враховуючи порушення радіальної симетрії радіаційного навантаження випромінювача, в антені, що досліджується, повинні виникнути наступні, після нульової, моди коливання, що і демонструє рис.2.10, на якому представлені частотні залежності амплітуд та фаз мод коливної швидкості поверхні випромінювача, що входить до складу антени, відповідно.



а)



б)

Рис.2.10 Частотні залежності амплітуд (а) та фаз (б) мод коливної швидкості поверхні випромінювача компенсованої конструкції

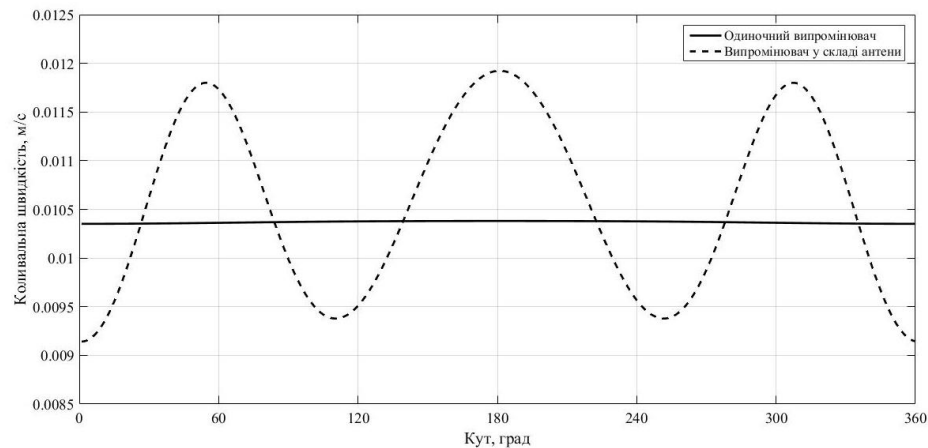
Аналіз приведених кривих демонструє, що в досліджуваній антені виникає ряд наступних мод коливань, амплітуди швидкостей яких на певних частотах такі самі, а в деяких випадках значно більші за амплітуду коливної швидкості нульової моди. Оскільки, у випромінювачі енергія «закачується» виключно на нульовій моді, то поява цих додаткових мод коливань свідчить про те, що енергія випромінювачів,

при їх роботі у складі антени ефективно перерозподіляється між наступними формами коливань.

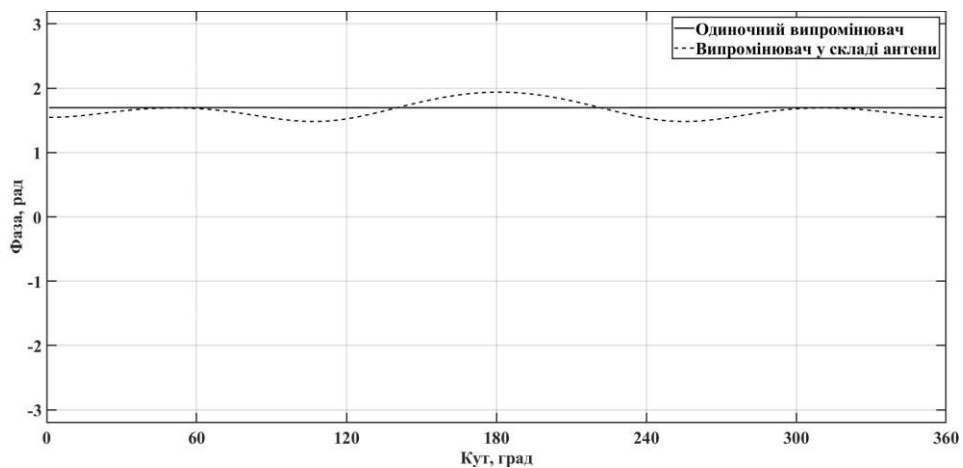
Співставлення кривих на рис.2.9 та 2.10 показує, що саме завдяки появі нових мод коливань досліджувана гідроакустична антена стає багаторезонансною, а загальний рівень амплітуд коливальних швидкостей поза частотами резонансів знижується. Так, в області низьких частот на частотах 950 Гц, 2810 Гц та 5590 Гц виникають описані вище резонансні викиди. При порівнянні їх із кривими на рис. 2.10 (а) видно, що ці викиди відповідають резонансним викидам коливальної швидкості другої, третьої та четвертої додаткових мод коливань оболонки. Аналізуючи розподілення фаз коливальних швидкостей цих мод, приведених на рис. 2.10 (б), видно, що вони майже всі протилежні фазі коливальних швидкостей нульової моди. Тому стає зрозумілим, чому загальний рівень коливальних швидкостей поверхні випромінювачів у складі антенної решітки, приведений на рис. 2.9 (а), поза резонансними викидами є нижчим за рівень коливань оболонки одиночного випромінювача. Фізичними причинами виникнення цих додаткових мод є те, що для низькочастотної гілки коливань при заданому значенні відношення  $h/r_0$  в досліджуваному діапазоні частот лежить декілька власних частот [7]. В цьому випадку для всіх частот оболонки механічні імпеданси випромінювачів мають характер маси. Саме взаємодія маси оболонки, приєднаної маси зовнішньої рідини і пружності п'єзокерамічної оболонки і об'єму рідини, що знаходиться в порожнині між екраном та випромінювачами, і створює передумови для появи в випромінювачах специфічних резонансів із відносно низькими частотами, що відсутні у власному спектрі частот оболонки випромінювача у вакуумі.

Так само, через велику протилежність фаз та великі амплітуди нульової та п'ятої мод (рис.2.10 а, б) в області резонансу з'являється провал. Це пояснюється тим, що при зв'язаних поздовжньо–згинних коливаннях циліндричної оболонки для кожної моди коливання, починаючи з першої, існують дві власні частоти, що відповідають принципово різним напружено-деформованим станам оболонки і належать двом гілкам розв'язку дисперсійного рівняння – низькочастотній та високочастотній.

В високочастотній же області, через співпадіння фаз коливальних швидкостей багатьох мод коливань з невеликими амплітудами, порівняно з викидами в низькочастотній області та резонансній областях, проходить складання їх амплітуд та виникають відсутні у одиночного випромінювача та у випромінювача, розміщеного поряд з екраном, викиди амплітуди коливальної швидкості.



а)

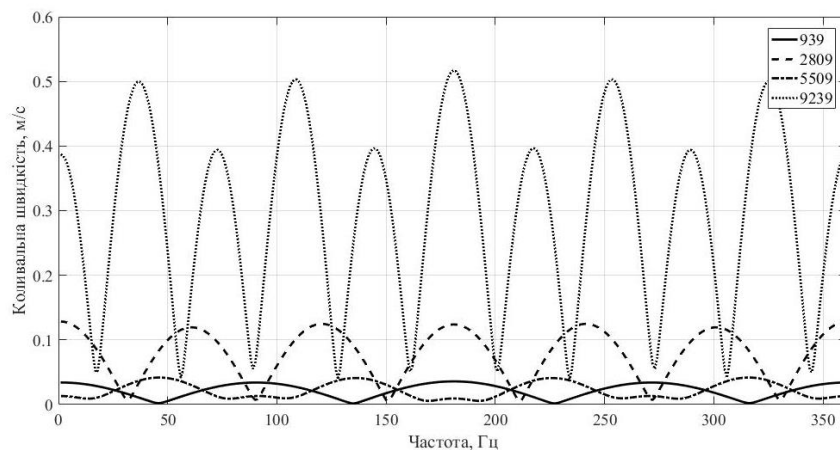


б)

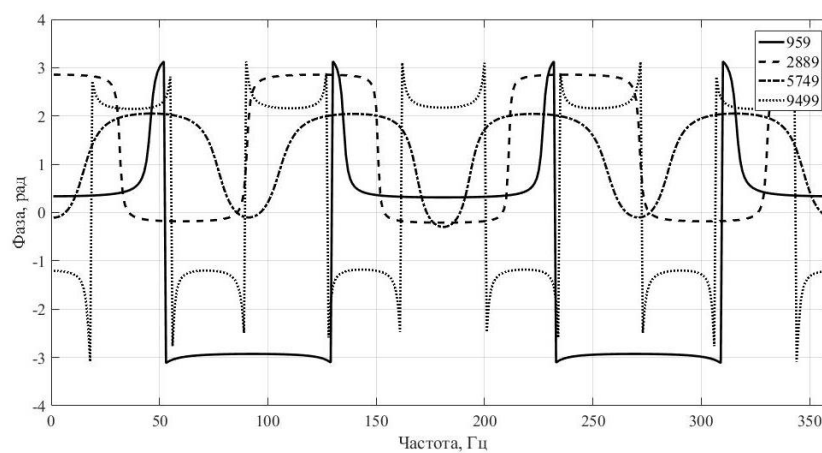
Рис. 2.11 Кутові залежності амплітуд (а) та фаз (б) коливальної швидкості поверхні випромінювача на частоті 4000 Гц.

Проведемо тепер аналіз кутового розподілення коливальної швидкості по поверхні одного з випромінювачів у складі кругової антени та порівняємо його із кутовим розподіленням коливальної швидкості поверхні одиночного випромінювача на частоті поза додатковими резонансами, наприклад, 4000 Гц, та на частотах, на яких виникають описані вище вузькосмугові резонансні викиди – 950 Гц, 2810 Гц та 5590 Гц. Криві, що демонструють залежність амплітуд та фаз коливальної швидкості

поверхні випромінювачів, приведені на рис. 2.11 (а, б), для частоти 4000 Гц, та рис. 2.12 (а, б), для частот додаткових резонансів.



а)



б)

Рис.2.12 Кутове розподілення амплітуди (а) та фази (б) коливальної швидкості

Як видно із наведених вище кривих, кутовий розподіл коливальної швидкості, поза частотами додаткових резонансів у випромінювача, що входить до складу антени, видозмінюється, порівняно із одиночним випромінювачем, формуючи певну спрямованість.

Кутові залежності амплітуд швидкостей радіальних коливань точок на поверхні випромінювача на частотах додаткових резонансів, так само, як і для антени, утвореною із перетворювачів силової конструкції, відповідають модам коливальних швидкостей, що збуджуються на цих частотах. Так з рис. 2.10 а, видно, що частоті 939 Гц відповідає друга мода коливань п'єзокерамічної оболонки випромінювача. На рис. 2.12 а кутове розподілення коливальної швидкості оболонки на цій же частоті відповідає формі другої моди коливань оболонки. Теж саме стосується і

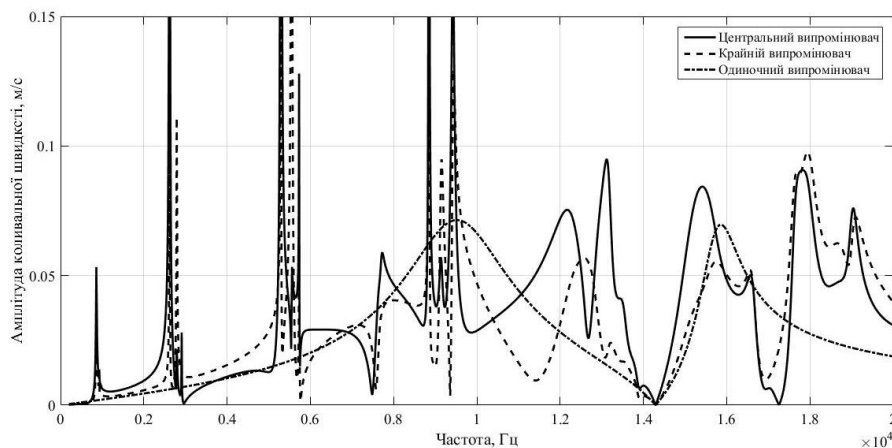
коливань на частотах резонансів третьої (2809 Гц), четвертої (5749 Гц) та п'ятої (9499 Гц) мод коливань оболонки.

Іншим цікавим фактом є те, що із ростом частоти збільшується вклад екрану в формування розподілення коливальної швидкості на поверхні випромінювача. Так, порівняння амплітуд коливальної швидкості на поверхні випромінювача в напрямку, протилежному екрану ( $\varphi = 0^\circ$ ), та амплітуд в напрямку на екран ( $\varphi = 180^\circ$ ) на частотах додаткових резонансів показує, що для низьких частот вони мало відрізняються. Проте, з ростом частоти амплітуда коливальної швидкості в напрямку на екран стає значно більшою за амплітуду коливальної швидкості в протилежному екрану напрямку. Це пов'язано з тим, що коливальна швидкість поверхні акустично-м'якого екрану досягає максимальних значень.

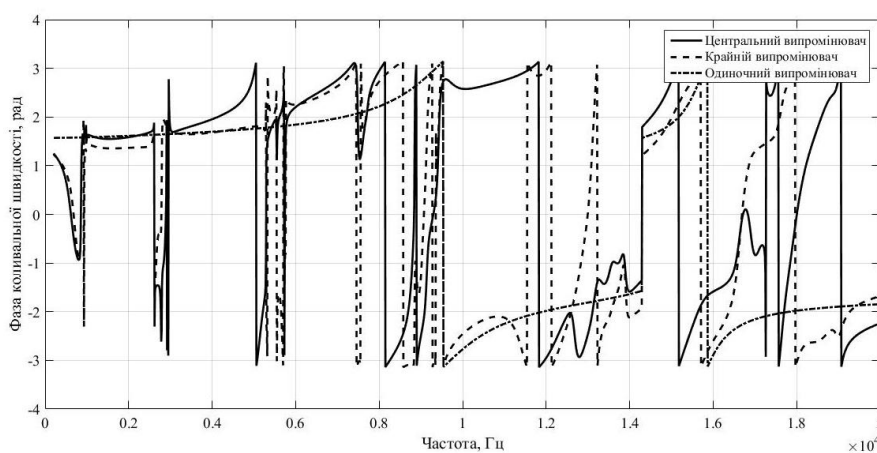
Розглянемо тепер ситуацію, коли випромінювачі у складі антени розміщені не рівномірно, а зведені в певний сектор, наприклад,  $60^\circ$ . В цьому випадку вплив випромінювачів один на одного значно збільшується, оскільки відстані між ними суттєво зменшуються порівняно із ситуацією рівномірного розміщення. Відстані між всіма елементами системи, в цьому випадку, вибрані 5 мм. На рис.2.14 (а та б) представлені залежності амплітуд та фаз коливальної швидкості поверхні центрального випромінювача, що працює у складі решітки, поверхні одного з крайніх випромінювачів, що працює у складі решітки та поверхні одиночного випромінювача. З представлених кривих видно, що антена, так само як і для випадку рівномірного розміщення випромінювачів у складі антени, стає багаторезонансною. Тому так само, як і для ситуації, коли випромінювачі розміщувались рівномірно, аналіз частотних характеристик будемо проводити в окремих частотних областях. Для цього розіб'ємо, як і раніше, всю досліджувану частотну область на 3 області – низькочастотну ( $f < 8000 \text{ Гц}$ ), область резонансу ( $8000 < f < 12000 \text{ Гц}$ ) та область високих частот ( $f > 12000 \text{ Гц}$ ).

Як і для попередньої ситуації, дослідження кривих розпочнемо із області низьких частот. Вона так само, як і для рівномірного розміщення випромінювачів у складі решітки, характеризується декількома цікавими особливостями. Так, першою з них є те, що амплітуда коливальної швидкості поверхні випромінювачів спадає зі

зменшенням частоти. Це спостерігається як для центрального випромінювача, так і для крайніх і для одиночного. Причиною цього є те, що зі зменшенням частоти



а)



б)

Рис.2.13 Залежність амплітуд (а) та фаз (б) коливальних швидкостей поверхонь випромінювачів при їх роботі у складі антени, що зведена в сектор, та поза межами антени швидко зростає власний механічний імпеданс п'єзокерамічної оболонки випромінювача, оскільки в цій області він має пружний характер. В той же час імпеданс випромінювання падає, оскільки хвильовий розмір випромінювача зменшується. Другою особливістю досліджуваних характеристик є виникнення, так само, як і для випромінювачів у складі антени з рівномірним розміщенням випромінювачів (рис. 2.9), великої кількості вузькосмугових резонансних викидів, амплітуди яких значно перевищують амплітуду коливальних швидкостей поверхні одиночного випромінювача та амплітуду коливальних швидкостей випромінювача поза цими викидами. Причому, амплітуди цих викидів та амплітуди коливальних швидкостей поверхонь випромінювачів у складі секторної антени та антени з



рівномірним розміщенням випромінювачів (рис. 2.9 (а)) є майже однаковими. В той же час частотні характеристики амплітуд коливальних швидкостей поверхонь випромінювачів секторної антени суттєво відрізняються від таких же частотних характеристик випромінювачів, як розміщених рівномірно у складі антени, так і характеристик одиночного випромінювача, розміщеного поблизу з акустичним екраном (рис. 2.9). Ці відмінності мають місце як, за кількістю резонансних викидів, так і за їхнім розподіленням по частотам. Встановлені ефекти є результатом збільшення взаємодії між випромінювачами, оскільки, в даному випадку відстань між елементами антени складає 5 мм. Іншим цікавим фактом є те, що через відмінності в радіаційному навантаженні центрального і крайніх випромінювачів у складі антени їх частотні характеристики в області низьких частот суттєво відрізняються між собою як за амплітудою, так і за розподіленням резонансних викидів по смузі частот. Такі порівняння між собою кривих, що відповідають центральному випромінювачу та одному з крайніх випромінювачів, видно, що частотна характеристика центрального випромінювача характеризується значно більшою кількістю вузькосмугових резонансних викидів, які знаходяться на близьких частотах. Порівняння амплітудної характеристики (рис. 2.13 (а)) з фазовою характеристикою (рис. 2.13 (б)) залежності коливальної швидкості від частоти видно, що вузькосмуговим резонансним викидам амплітудної частотної характеристики відповідають викиди фазової характеристики випромінювача.

Перейдемо тепер до розгляду області резонансу. Ця область так само, як і область низьких частот, характеризується декількома цікавими особливостями. Першою особливістю є те, що в області резонансу, так само як і в області низьких частот, в частотній характеристиці випромінювачів у складі антени, порівняно із частотною характеристикою одиночного випромінювача, виникає велика кількість вузько смугових резонансів, амплітуди яких значно перевищують амплітуду характеристики одиночного випромінювача. Ця особливість спостерігається як для центрального, так і для бічних випромінювачів у складі трьохелементної секторної антени з екраном. Однак, розподіл цих резонансних викидів, так само як і для області низьких частот, в області резонансу в частотних характеристиках

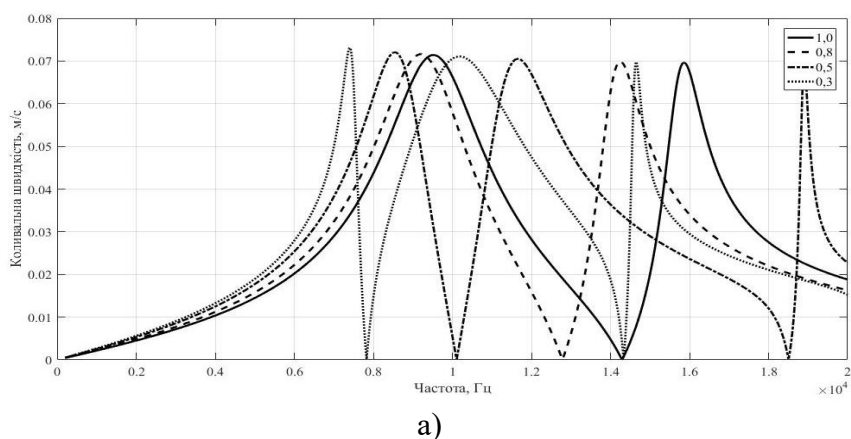
центрального та бічних випромінювачів відрізняються між собою по значенням резонансних частот. Це добре видно із фазової характеристики коливальної швидкості випромінювачів у складі антени. Іншою цікавою особливістю є те, що окрім резонансних викидів в частотних характеристиках випромінювачів у складі трьохелементної секторної антени з екраном виникає велика кількість провалів резонансної характеристики, амплітуди яких є значно меншими за амплітуду одиночного випромінювача в області резонансу. Також цікавою особливістю отриманих частотних характеристик є те, що частотна характеристика центрального випромінювача має більш гострий характер, порівняно із частотною характеристикою бічних випромінювачів.

Перейдемо тепер до розгляду області високих частот. Ця область так само, як і дві попередніх області, характеризується великою кількістю особливостей порівняно із відповідною областю для одиночного та одиночного, розміщеного поряд із екраном випромінювачів і випромінювачів у складі трьохелементної антени. Розділимо область високих частот на дві менші області, перша –  $12000 < f < 14000$  Гц, та друга –  $f > 14000$  Гц. В першій області частотні характеристики центрального і бокового випромінювачів суттєво відрізняються від характеристик випромінювачів, що розглядались до цього, характеризувалась різким спадом рівня амплітуди коливань, чого не можна сказати про відповідні характеристики випромінювачів у складі секторної трьохелементної антени. Так в частотній характеристиці центрального випромінювача виникають два досить ширококутових резонансних викиди. Амплітуди цих викидів в декілька разів перевищують амплітуду коливань одиночного випромінювача. Відповідна область крайнього випромінювача, характеризується одним досить ширококутовим резонансним викидом, амплітуда якого так само, як і у центрального випромінювача, в декілька разів перевищувала амплітуду коливальної швидкості одиночного випромінювача. Фазові характеристики резонансних викидів центрального та бічних випромінювачів є протилежними між собою. Спад частотної характеристики, присутній в характеристиках випромінювачів, що розглядались вище, зберігається і в частотних характеристиках випромінювачів у складі

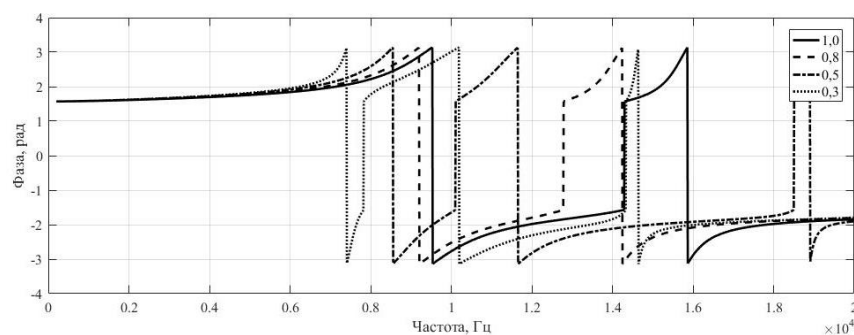
трюхелементної секторної антени з екраном. Однак, через наявність додаткових резонансних викидів для цих двох випромінювачів вона характеризується значно більшою крутизною.

Друга ж область області високих частот, так само як і перша область, характеризується виникненням в частотній області додаткових резонансних викидів, амплітуд яких значно перевищують амплітуду коливальних швидкостей поверхні одиночного випромінювача в цій частині області. Але, на відміну від попередніх областей амплітуда коливальних швидкостей поза резонансами все одно перевищує амплітуду швидкості поверхні одиночного випромінювача в цій частотній області. В ній, як і у центрального випромінювача, так і у бічних випромінювачів спостерігається спад амплітуди коливальної швидкості з ростом частоти. Ще однією особливістю є те, що в цій області в характеристиках випромінювачів, що розглядаються, виникають провали амплітуд. При цьому провал частотної характеристики коливальної швидкості центрального випромінювача є більш гострим порівняно із провалом характеристики бічного випромінювача.

Як відомо, внутрішнє середовище випромінювачів компенсованої конструкції може бути заповнене, не тільки середовищем, хвильовий опір якого є таким самим, як і хвильовий опір оточуючого середовища, але і середовищем з іншим хвильовим опором. Дослідимо вплив величини хвильового опору внутрішнього середовища випромінювача на частотну характеристику його коливальної швидкості. Для цього порівнюємо частотні характеристики одиночного випромінювача, внутрішній об'єм якого заповнений середовищем з відносним хвильовим опором, рівним 1,0; 0,8; 0,5 та 0,3. Їх графіки приведені на рис.2.14.



а)



б)

Рис.2.13 Частотна залежність амплітуд (а) і фаз (б) коливальної швидкості на поверхні одиночного випромінювача компенсованої конструкції з різним заповненням внутрішнього об'єму випромінювача.

Як видно із приведених на рис.2.13 графіків, зниження хвильового опору рідини, що заповнює внутрішній об'єм випромінювача, призводить до зниження частоти основного резонансу випромінювача та до виникнення ряду додаткових резонансів, амплітуди яких в області високих частот такі ж, як і амплітуда основного резонансу. Основний же резонанс при цьому загострюється, а в області низьких частот залежність від середовища, що заповнює випромінювач, майже зникає.

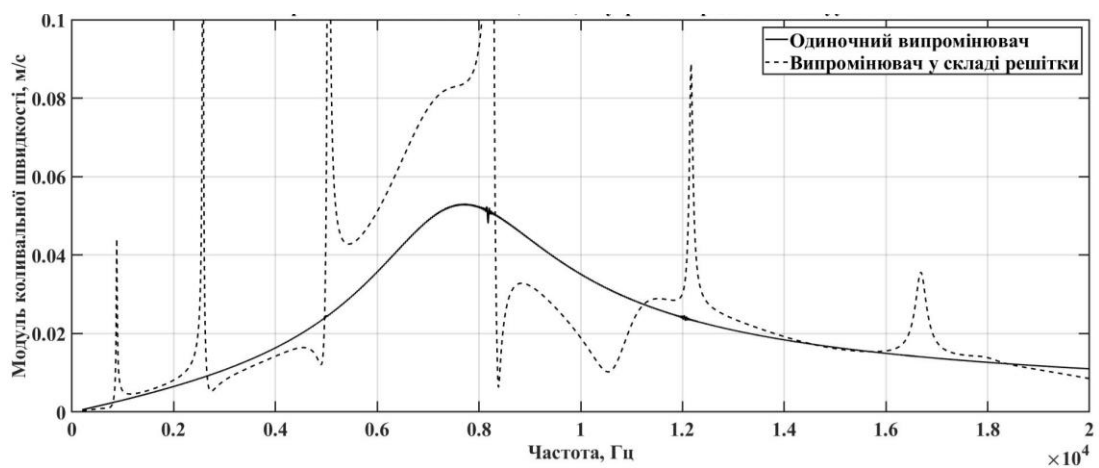
## 2.4. Властивості механічних полів кругових антен з екраном в залежності від складу застосованої в конструкції випромінювачів п'єзокераміки та її поляризації.

Суттєвим елементом конструкції кругових антен з екраном є склад і поляризація п'єзокераміки, застосованої при побудові їх циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів. Саме характер поляризації п'єзоелементів, використаних у випромінювачах, визначає схему їх конструктивної побудови. З іншого боку електрофізичні параметри п'єзокерамічних елементів випромінювачів суттєво різняться між собою як для різних складів п'єзокераміки, так і при різних характерах поляризації п'єзоелементів виготовлених із неї.

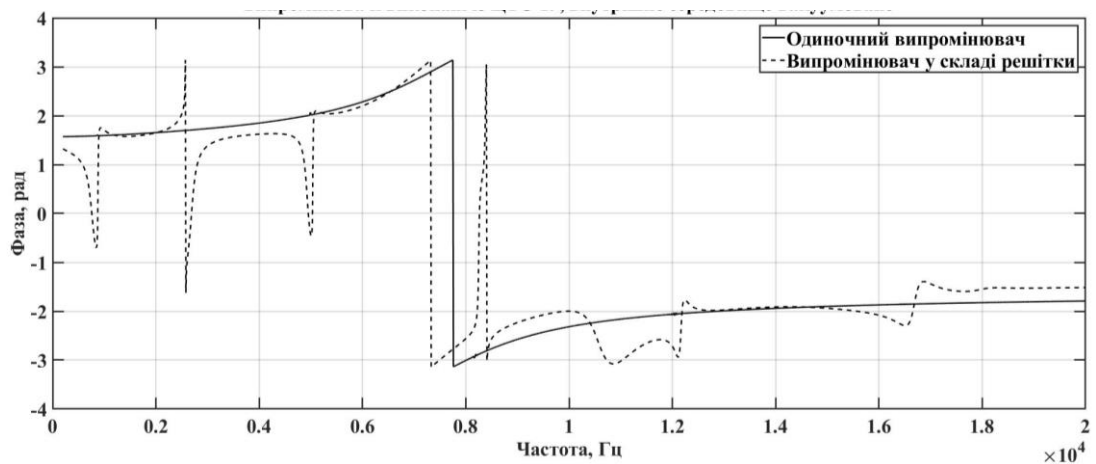
Дослідимо вплив цих конструктивних характеристик циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів на властивості механічних полів кругових антен з екранами. Для забезпечення можливості співставлення отриманих при цьому результатів з раніше одержаними даними для складу п'єзокераміки ЦТБС-3 і окружною поляризацією п'єзоелементів виготовлених із неї розрахунки

будемо проводити для наступних параметрів антен: середній радіус випромінювачів – 0,068 м; товщина п'єзокерамічної оболонки – 0,008 м; склад п'єзокераміки – ЦТС-19 та ТБК-3; поляризація – окружна для ЦТС-19 та ТБК-3 та радіальна для ЦТБС-3; кількість п'єзоелементів при окружній поляризації – 48; кількість випромінювачів в антені – 3; випромінення – кругове та секторне; кут розкриття при секторному випромінненні –  $60^\circ$ ; радіус екрана – 0,072 м; відстань між поверхнями екрану та випромінювачів – 0,005 м. Коливальна швидкість визначається для точки на поверхні випромінювача, яка розташована в напрямку, протилежному напрямку на екран.

Як і раніше, розглянемо два випадки випромінення кругової антени з екраном – кругове та секторне. Результати розрахунків механічних полів, що відповідають цим



а)



б)

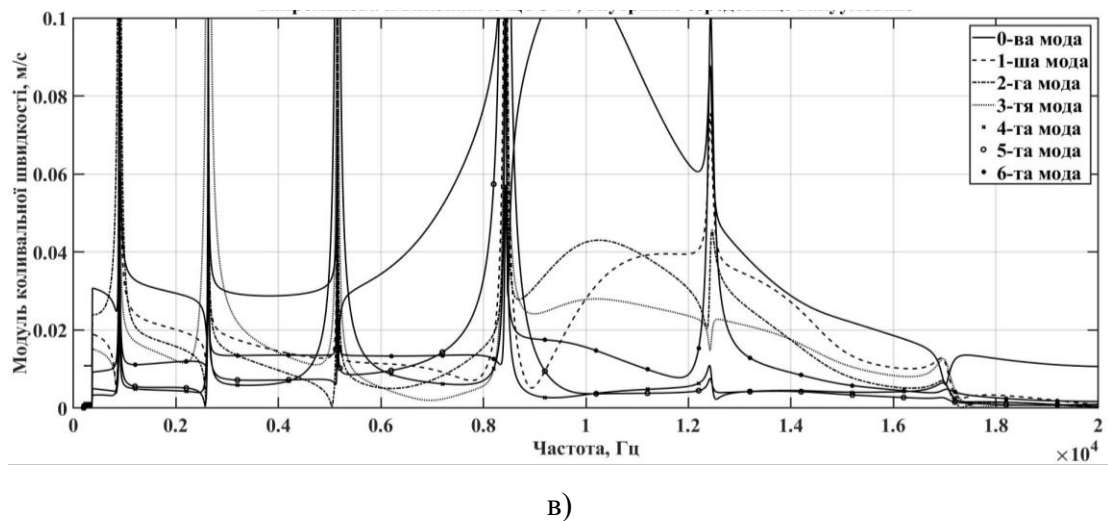
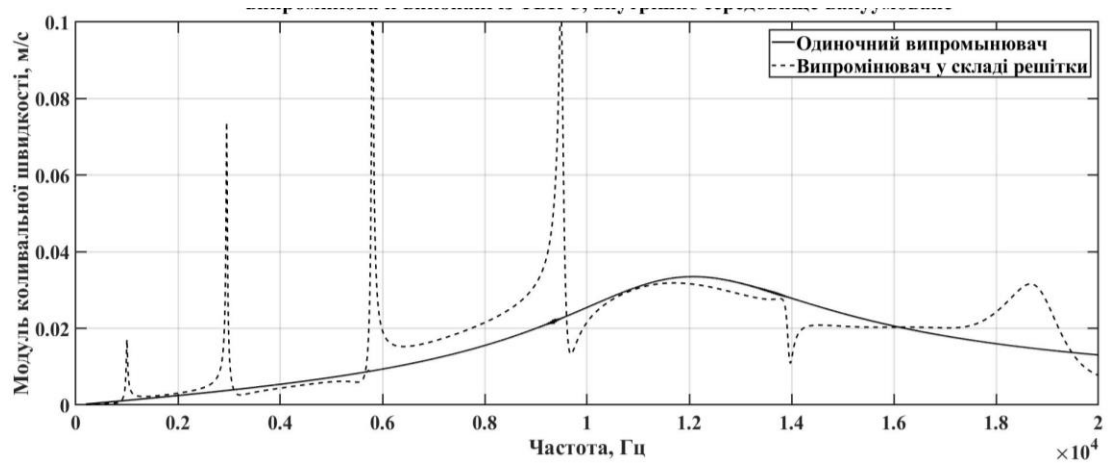


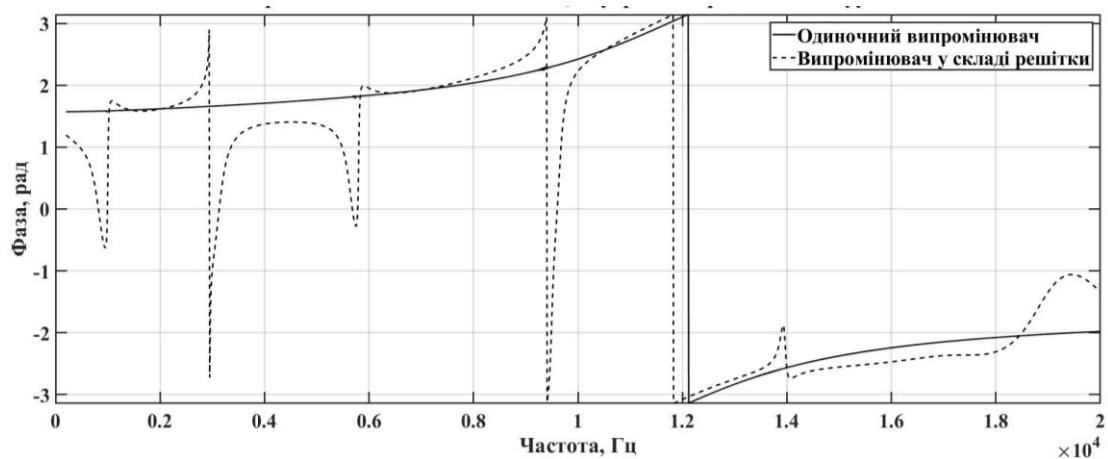
Рис.2.14 Частотні залежності амплітуд (а, в) та фаз (б) радіальних коливальних швидкостей поверхонь (а, б) та їх мод (в) для випромінювачів антени зі складу ЦТС-19 при круговому випромінненні

випадкам, наведені на рис. 2.14, 2.15 – для кругового випроміннення і на рис. 2.16, 2.17 – для секторного випроміннення.

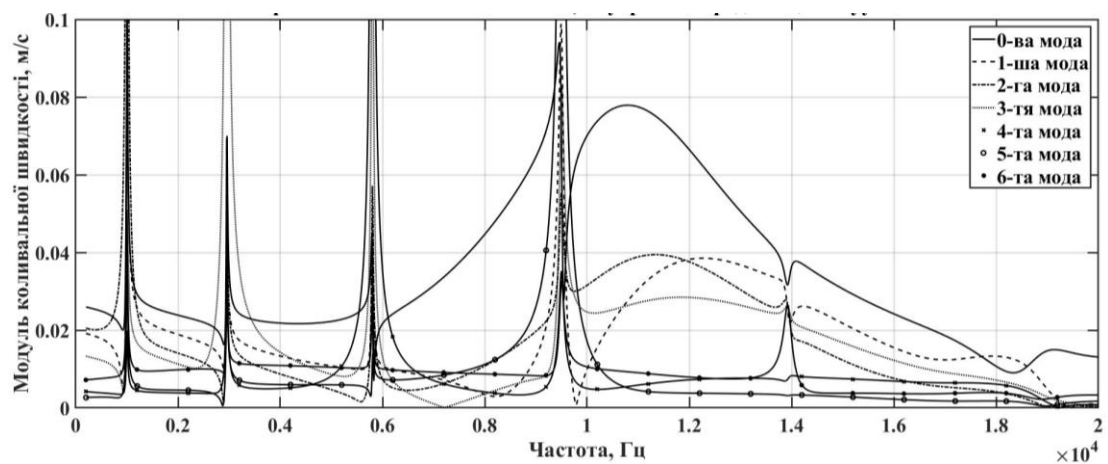
Аналіз частотних залежностей амплітуд і фаз механічних полів при круговому випромінненні (рис. 2.1, 2.14 і 2.15) свідчить про те, що встановлені раніше закономірності поведінки механічних полів для кругових антен, утворених із випромінювачів зі складом п'єзокераміки ЦТБС-3 при окружній поляризації п'єзоелементів зберігаються і при застосуванні випромінювачів із іншим складом п'єзокераміки. Але є певні відмінності, пов'язані із різними кількісними значеннями електрофізичних параметрів складів п'єзокераміки. Вони полягають в наступному. Хоча кількість резонансних викидів в дорезонансній і резонансній областях зберігається, значення частот цих викидів суттєво змінюються. Це свідчить про те, що при збереженні хвильових розмірів кругової антени з екраном в цілому значеннями додаткових її власних частот можливо керувати вибором відповідного складу п'єзокераміки її випромінювачів. Природно, що при цьому змінюється також і ефективність перетворення електричної енергії в механічну. Отримані в результаті досліджень аналітичні вирази і наведені кількісні розрахунки дозволяють при проектуванні досліджуваних антен і в цьому питанні здійснювати раціональний вибір складу п'єзокераміки.



а)



б)

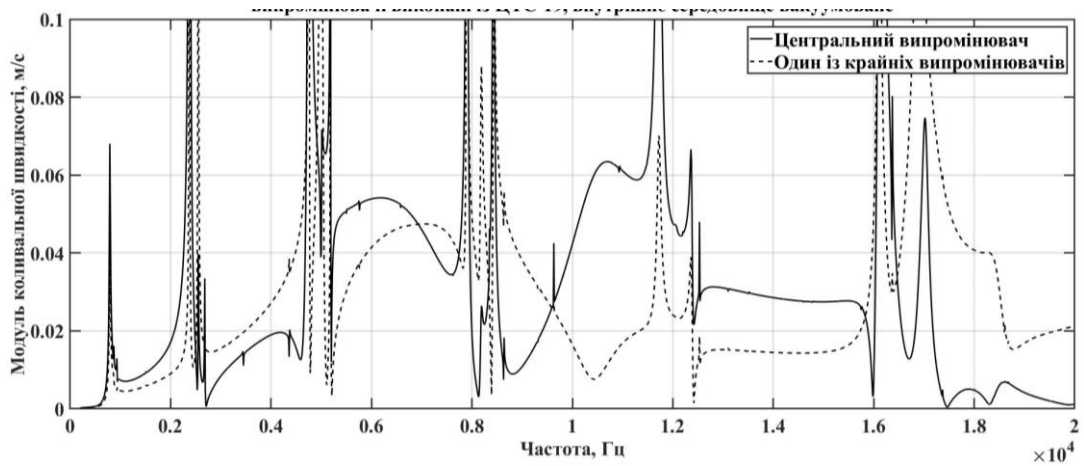


в)

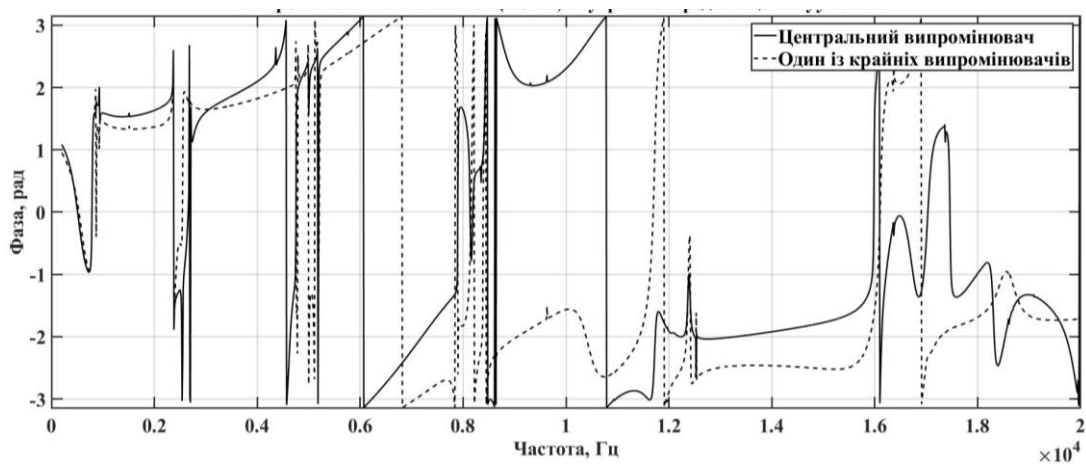
Рис. 2.15 Частотні залежності амплітуд (а, в) та фаз (б) радіальних коливальних швидкостей поверхонь (а, б) та їх мод (в) для випромінювачів антени зі складу ТБК-3 при круговому випромінненні

Аналіз кривих рис. 2.2, 2.14 в і 2.15 в дозволяє визначити і кількісні характеристики впливу складів п'єзокераміки в випромінювачах на рівень зв'язаності фізичних полів в них в процесі перетворення електричної енергії в

механічну, а потім в акустичну. Як бачимо, кількість енергетично активних мод коливань, поява яких обумовлена впливом акустичної взаємодії елементів кругової антени з екраном, зі зміною складів п'єзокераміки у випромінювачах практично не змінюється. Змінюється ефективний перерозподіл електричної енергії, яка «закачується» у випромінювач на нульовій моді їх коливань, між наступними заново генерованими модами. При цьому ефективність цього перерозподілу в різних частотних діапазонах суттєвим чином визначається складом застосованої у випромінювачах п'єзокераміки.



а)



б)



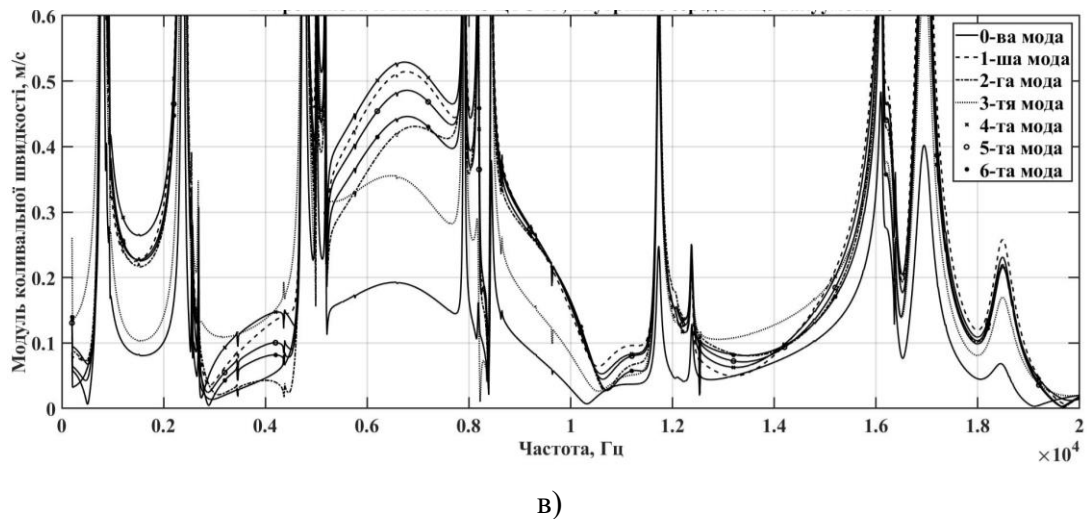


Рис. 2.16 Частотні залежності амплітуд (а, в) та фаз (б) радіальних коливальних швидкостей поверхонь випромінювачів (а, б) та їх мод (в) для центрального випромінювача антени зі складу ЦТС-19 при секторному випромінненні.

Розглянемо тепер механічні поля випромінювачів із різним складом п'єзокераміки при секторному випромінненні кругової антени з екраном. Із фізичних умов витікає, що в цьому випадку, по-перше, різні випромінювачі в секторі знаходяться в різних умовах акустичного навантаження і, по-друге, відстані між випромінювачами в секторі значно менші ніж при круговому випромінненні. Зрозуміло, що в цьому випадку взаємодія елементів кругової антени з екраном по зовнішньому акустичному полю буде суттєво відрізнятися від такої при круговому випромінненні. Тому і механічні поля випромінювачів будуть іншими.

Аналіз кривих рис.2.6, 2.15 та 2.16 свідчить про наступне. По-перше, оскільки акустична взаємодія випромінювачів в круговій антені з секторним випромінненням є різною для крайніх та середніх випромінювачів у зв'язку з їх розміщенням в секторі частотні залежності амплітуд і фаз механічних полів крайніх і середніх випромінювачів відрізняються між собою. Суттєвий вплив на цю різницю здійснюють електрофізичні параметри складів п'єзокераміки. Особливо це видно по амплітудам коливальних швидкостей (рис.2.6 а, в, 2.16 а і 2.17 а), які у сучасних складів п'єзокераміки системи ЦТС значно перевищують такі ж амплітуди складу системи ТБК. В той же час фазові частотні залежності коливальної швидкості, особливо в низькочастотній області, мало відрізняються між собою. По-друге, оскільки хвильові розміри випромінювачів з різними складами п'єзокераміки для

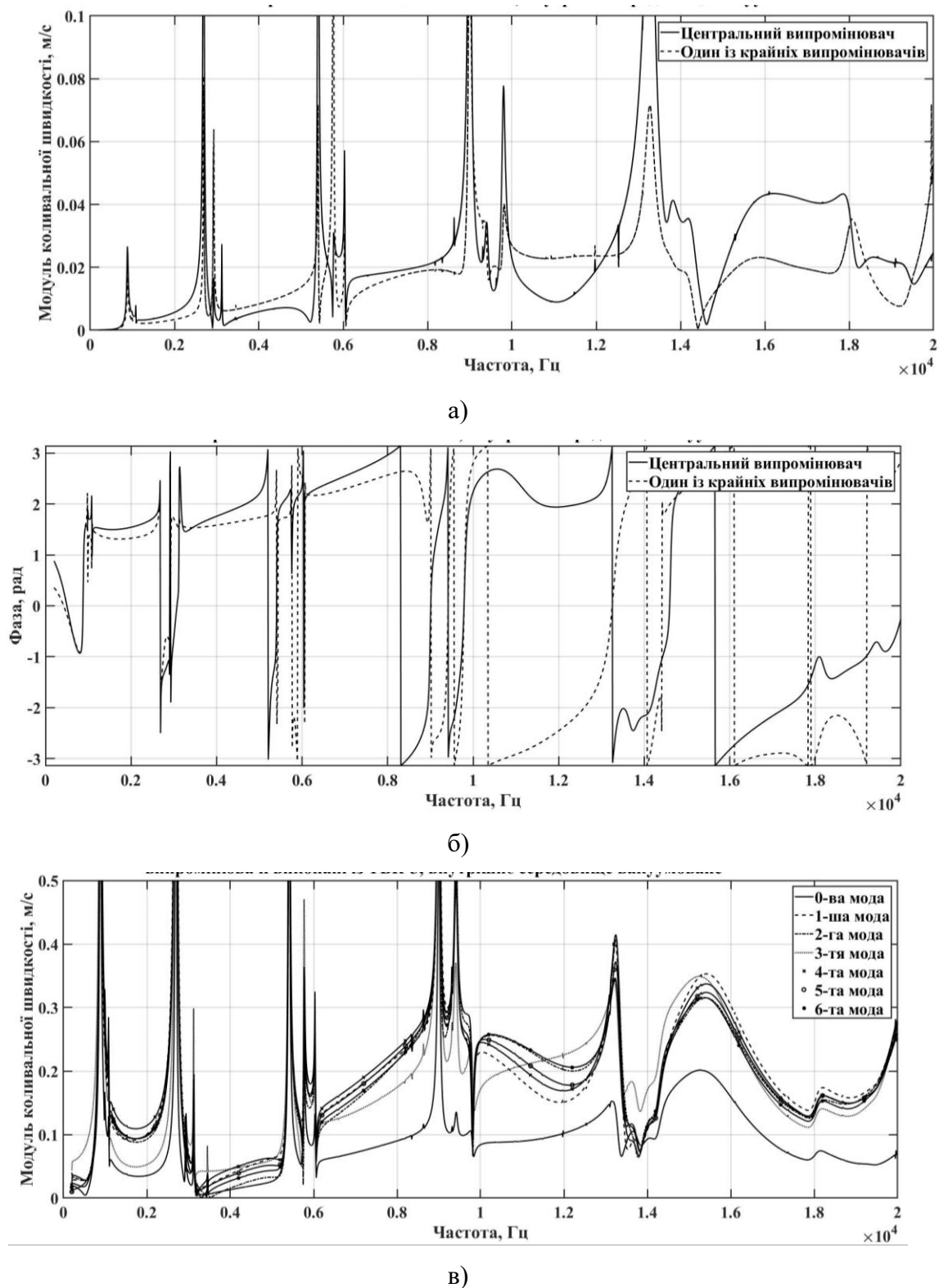


Рис. 2.17 Частотні залежності амплітуд (а, в) та фаз (б) радіальних коливальних швидкостей поверхонь випромінювачів (а, б) та їх мод (в) для центрального випромінювача зі складу ТБК-3 антени при секторному випромінненні

порівнюваних антен однакові, то кількість додаткових власних механічних резонансів, що заново генеруються в досліджуваних антенах, особливо в низькочастотній області, однакова. Вплив різних електрофізичних параметрів

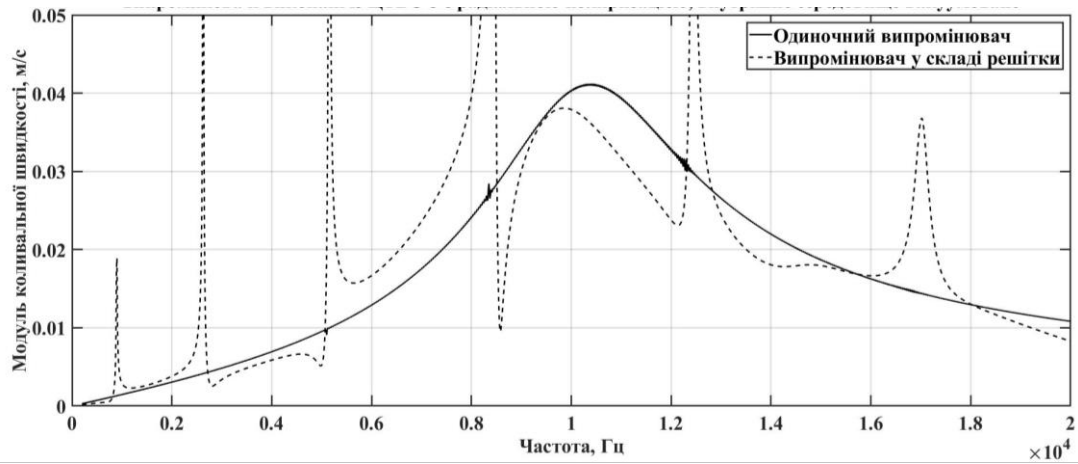
складів п'єзокераміки проявляє себе в тому, що значення параметрів заново генерованих власних частот, хоча і незначним чином, але відрізняються між собою.

По-третє, для всіх складів п'єзокераміки додаткові заново генеровані власні частоти резонансів механічних полів крайніх в секторі випромінювачів вищі ніж у середніх випромінювачів робочого сектора кругової антени з екраном. Це обумовлено різним акустичним навантаженням випромінювачів в секторі, обумовленим різним набором випромінених та відбитих акустичних хвиль, якими обмінюються випромінювачі в зовнішньому акустичному полі антени.

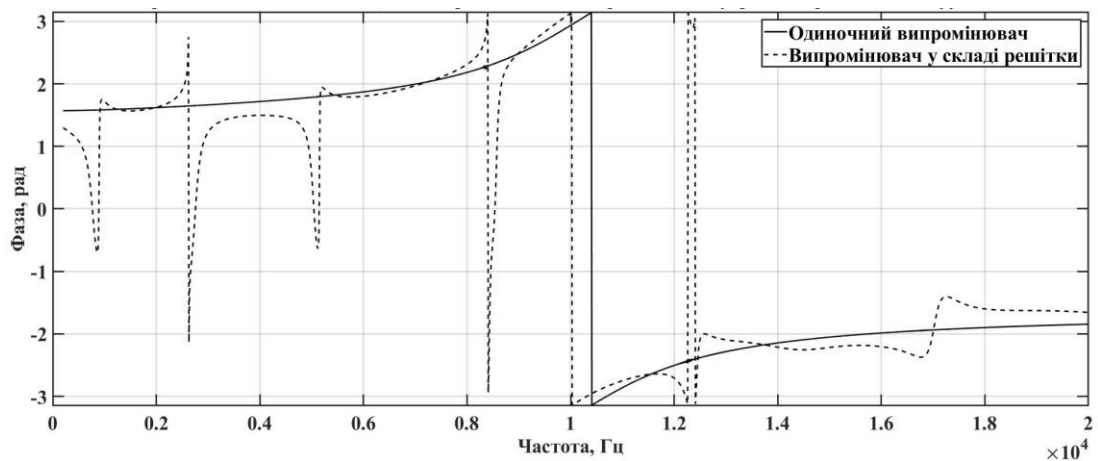
І, нарешті, по-четверте, різне акустичне навантаження випромінювачів в залежності від місця їх розташування в робочому секторі кругової антени з екраном, але однакове для однакових випромінювачів порівнюваних антен по-різному, в залежності від складу п'єзокераміки, збуджує в випромінювачах додаткові моди коливань (рис.2.7, 2.16 в і 2.17 в) і з різною ефективністю перекидає енергію нульової моди, на якій електрична енергія «закачується» в випромінювачі антени і перетворюється ними в механічну енергію, між наступними заново генерованими модами. Хоча кількість ефективно генерованих мод коливань однакова для антен з різними складами п'єзокераміки, що свідчить про близькість несиметричностей акустичних навантажень в випромінювачах порівнюваних антен, однак ефективність перетворення як електричної енергії в механічну, так і поділу енергії нульової моди між заново генерованими модами визначається електрофізичними параметрами п'єзокераміки. Це добре видно із співставлення кривих зазначених вище рисунків.

Перейдемо тепер до досліджень впливу поляризації випромінювачів на параметр кругових антен з екраном. Для визначення цього впливу порівняємо між собою результати розрахунків параметрів антен з випромінювачами на основі п'єзокераміки складу ЦТБС-3 з окружною (рис.2.1, 2.2, 2.6, 2.7) та радіальною (рис.2.18, 2.19) поляризаціями. Аналіз частотних залежностей амплітуд та фаз коливальних швидкостей випромінювачів досліджуваних антен при круговому випромінненні (рис. 2.1, 2.2 та 2.18) свідчить про наступне. По-перше, як і очікувалось, енергетична ефективність одного і того ж складу п'єзокераміки, але

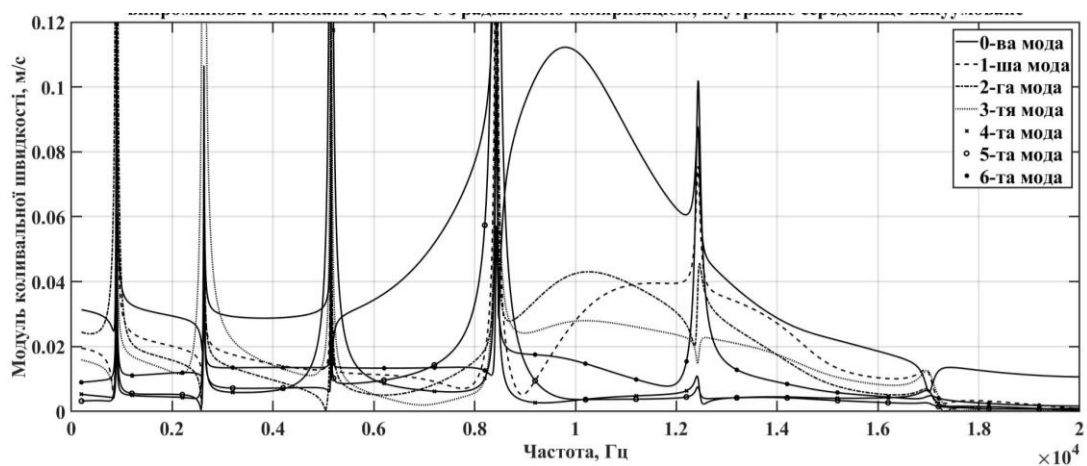
при різній поляризації п'єзоелементів з неї суттєво знижується при використанні радіальної поляризації. Коливальні швидкості випромінювачів з радіальною поляризацією майже вдвічі менші від таких при окружній поляризації. Цей факт обумовлений суттєво меншим значенням



а)



б)



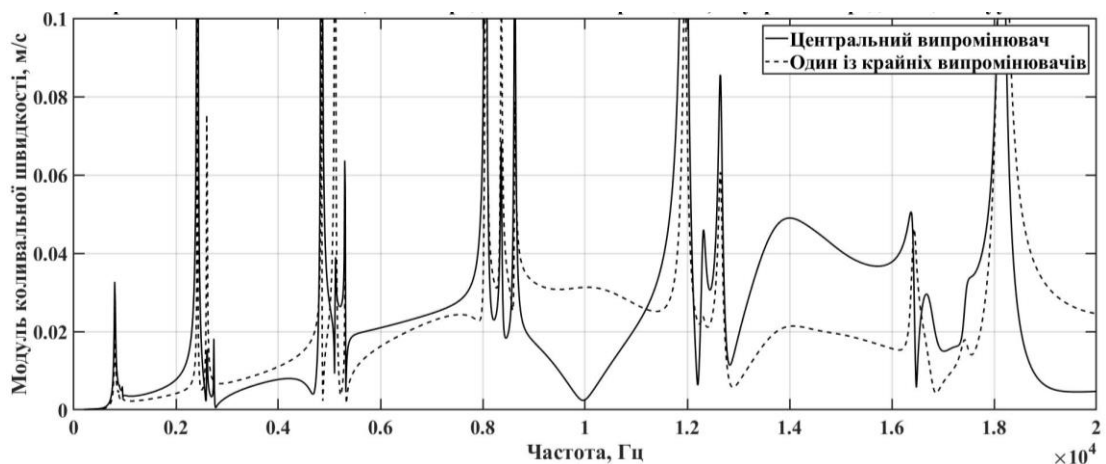
В)

Рис.2.18 Частотні залежності амплітуд (а, в) та фаз (б) радіальних коливальних швидкостей поверхонь випромінювачів з радіальною поляризацією зі складу ЦТБС-3 (а, б) та їх мод (в) для антени з круговим випроміненням

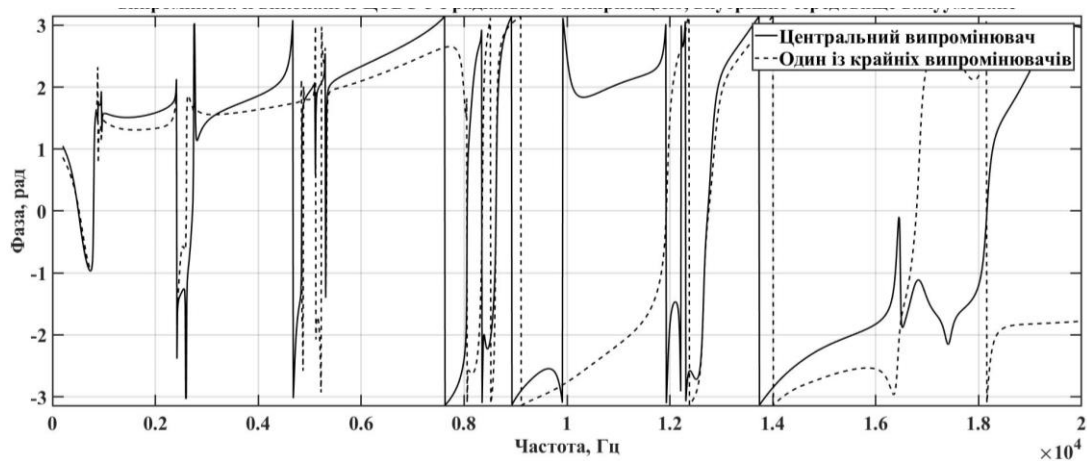
$d_{31}$  порівняно із  $d_{33}$ , хоча в досліджуваних випадках напруженість електричного поля при окружній поляризації майже на 10% менша такої ж напруженості при радіальній поляризації.

По-друге, по своїй формі амплітудні і фазочастотні залежності при круговому випромінненні, але різній поляризації випромінювачів в низькочастотній і резонансній областях майже не відрізняється між собою. Суттєва різниця виникає між ними лише в високочастотній області. Різниця між випромінювачами з різною поляризацією проявляється також і в тому, що частоти їх додаткових власних механічних резонансів значно відрізняються між собою. При цьому радіальна поляризація випромінювачів у складі кругової антени з екраном забезпечує більш низькі значення частот додаткових механічних резонансів, хоча у одиночного випромінювача з радіальною поляризацією власна частота вища ніж при окружній поляризації. Встановлений факт може слугувати ще одним із інструментів управління частотними характеристиками досліджуваних антен, а саме, за допомогою використання в випромінювачах різної поляризації їх п'єзоелементів.

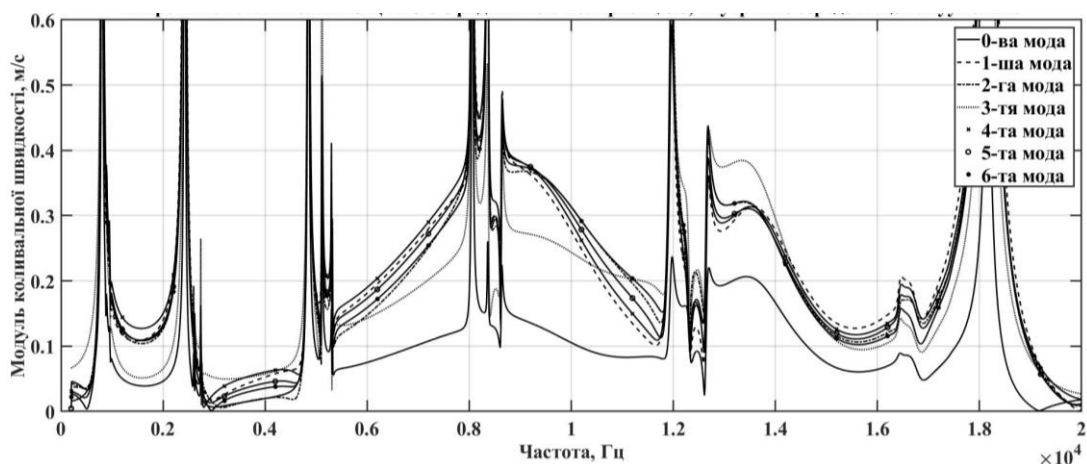
І, по-третє, фізичні умови функціонування кругових антен з екраном, утворених із випромінювачів з різною поляризацією, відрізняються лише електрофізичними характеристиками їх п'єзоелементів. Тому і в досліджуваних антенах має місце



а)



б)



в)

Рис.2.19 Частотні залежності амплітуд (а, в) та фаз (б) радіальних коливальних швидкостей поверхонь випромінювачів з радіальною поляризацією зі складу ЦТБС-3 (а, б) та їх мод для центрального випромінювача (в) антени з секторним випроміненням

порушення радіальної симетрії акустичного навантаження випромінювачів, обумовлене обміном випроміненими ті відбитими тілами антени звуковими хвилями в її зовнішньому просторі. В свою чергу таке порушення симетрії акустичного навантаження при збереженні її при електричному навантаженні обумовлює появу в механічних полях випромінювачів з радіальною поляризацією наступних за нульовою мод коливань і перерозподіл енергії, «закачуваної» в випромінювачі на нульовій моді між всіма модами коливань. Характер перерозподілу демонструють криві рис. 2.18 в. Їх співставлення з графіками рис. 2.2 свідчить про те, що характер поляризації здійснює вплив на кількісні показники перерозподілу енергії нульової моди між всіма заново генерованими модами.

Зміна режиму випромінення кругової антени з екраном з кругового на секторний і у випадку радіальної поляризації (рис. 2.19) суттєвим чином впливає на частотні характеристики випромінювачів у складі антени. По-перше, збільшується кількість власних додаткових резонансів в механічних полях випромінювачів, особливо в високочастотній області. По-друге, частоти додаткових резонансів крайніх і середніх випромінювачів в випромінюючому секторі антени відрізняються між собою, а їх кількість значно зростає, особливо у крайніх випромінювачів. По-третє, резонансні області і у середніх, і у крайніх випромінювачів сектору практично розвалюються, оскільки значення амплітуд коливальних швидкостей на власній частоті одиночного випромінювача у випромінювачів у складі антени досягає мінімальних значень порівняно із іншими частотами. Суттєвих змін зазнають і частотні залежності амплітуд мод коливальних швидкостей випромінювачів (рис. 2.19 в). При цьому в дорезонансній і післярезонансній областях їх форми близькі між собою і відрізняються кількісними значеннями амплітуд коливальних швидкостей, які є більшими у випромінювачів з окружною поляризацією (рис. 2.7). В резонансній області змін зазнають як кількісні значення, так і форми частотних залежностей

## **2.5 Властивості механічних полів кругових антен з екраном в залежності від конструктивних характеристик антен та їх елементів**

Дослідимо властивості механічних полів кругових антен з екранами в залежності від ряду конструктивних характеристик антен та їх елементів. До цих конструктивних характеристик віднесемо: розміри акустичного екрану; кількість випромінювачів в антені; відстані між елементами в антені. Як і раніше, дослідження властивостей механічних полів будемо здійснювати для двох режимів роботи антени – кругового і секторного. Всі розрахунки виконувалися для наступних параметрів антен: кількість випромінювачів у складі антени –  $N = 3; 4; 5$ ; радіус акустичного екрану  $r_{0N+1} = r_0; 3r_0; 5r_0$ ; відстань між поверхнями випромінювачів та екраном  $R_0 - r_{0N+1} - r_0 = 0,005\text{м}; 0,01\text{м}; 1\text{м}; 10\text{м}$ ; середній радіус випромінювачів  $r_0 = 0,068\text{м}$ ; товщина п'єзокерамічної оболонки  $h = 0,008\text{м}$ ; склад п'єзокераміки – ЦТБС-3; поляризація – окружна; кількість п'єзоелементів в оболонці – 48; внутрішнє простір випромінювача – вакуумований. Радіальна

швидкість визначалася для точок на поверхнях випромінювачів, які розташовані в напрямках, протилежних напрямку на екран. При секторному випромінюванні розкриття сектора становив  $60^\circ$ .

Аналіз частотних (рис.2.20) та кутових (рис.2.21) залежностей амплітуд і фаз коливальних швидкостей випромінювачів при круговому випромінюванні свідчать про наступне. При збільшенні розмірів екрана в низькочастотній області коливальні швидкості випромінювачів (2.20 а) майже не змінюються. Незначні зміни мають місце в резонансній та високочастотній областях, і полягають в основному в зменшенні амплітуд коливань при збільшенні розмірів екрану. Це дозволяє зробити висновок про збільшення впливу акустичного екрану на механічні поля випромінювачів антен.

Аналіз кутових залежностей радіальної швидкості при збільшенні розмірів екрану виглядає більш цікаво. По-перше, при зміні розмірів екрану в областях

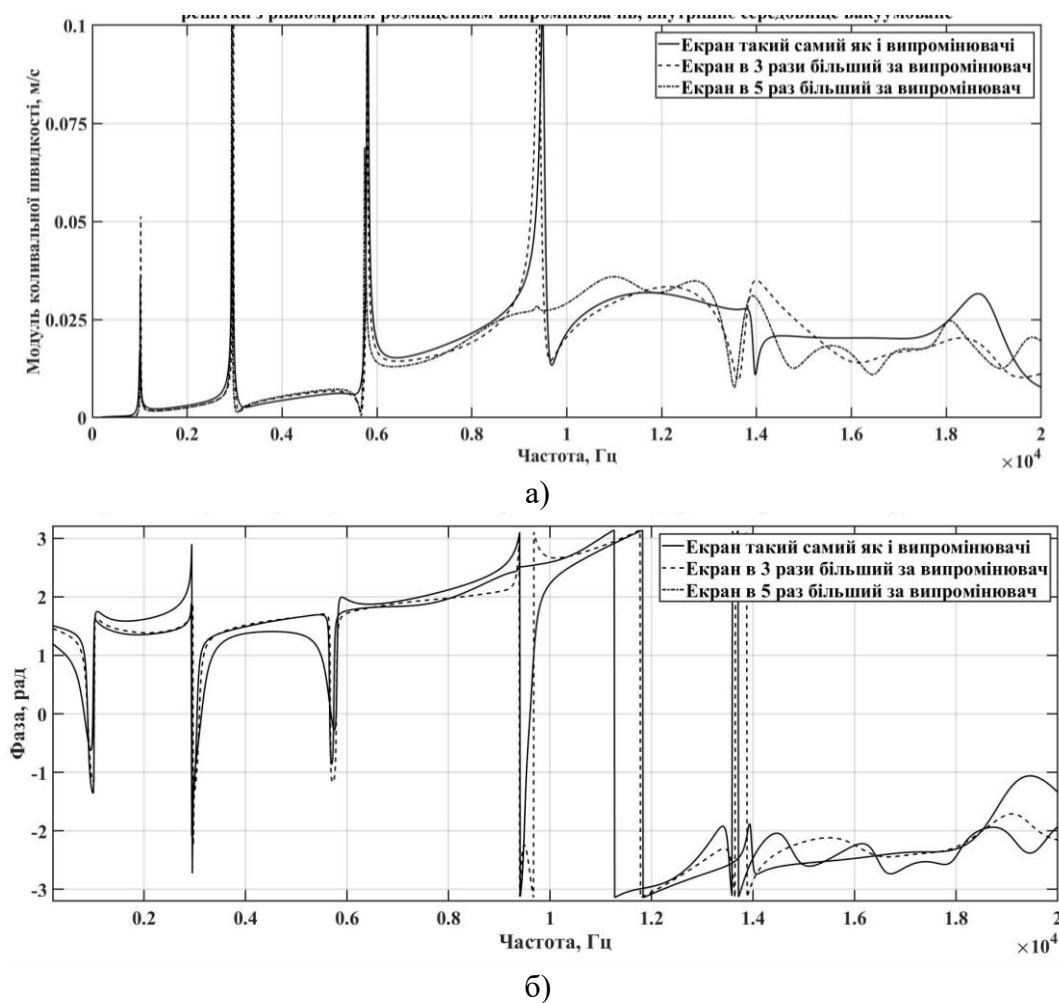
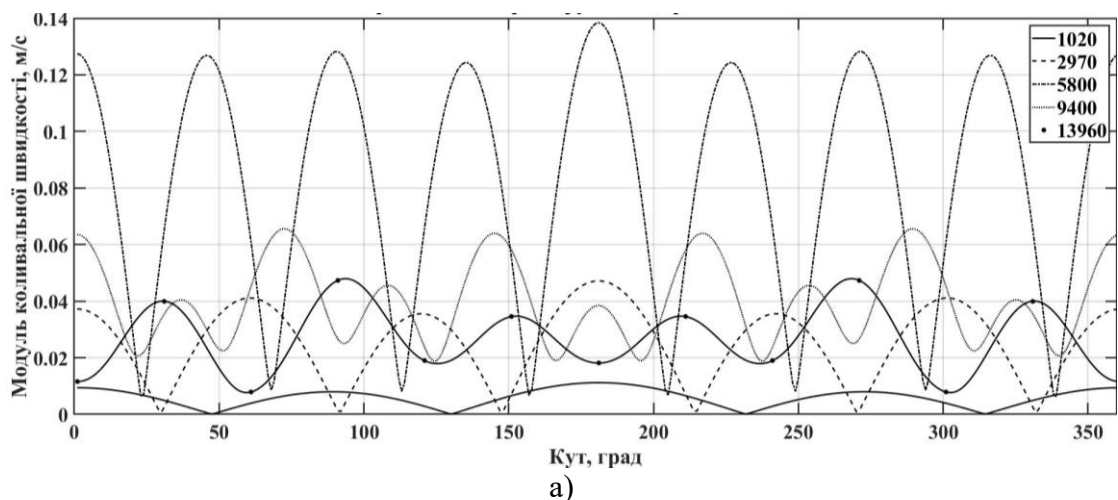




Рис. 2.20 Частотні залежності амплітуд (а) та фаз (б) коливальної швидкості поверхонь випромінювачів трьохелементної антени з екранами різних розмірів при рівномірному випромінненні

додаткових резонансів (рис.2.21) коливальні швидкості характеризуються значною нерівномірністю. Ця нерівномірність, для екранів всіх розмірів зростає в резонансній області випромінювачів і зменшується в низькочастотній і високочастотній областях. По-друге, аналіз фазових кутових розподілів (рис. 2.21 б) показує, що не для всіх частот додаткових резонансів кутові розподіли фаз, що чергуються між собою, мають протилежні по знаку значення фаз. Це характерно лише для низькочастотної області. По-третє, розміри екрану суттєвим чином впливають на амплітуди коливальних швидкостей. Зокрема, для екрана розміром втричі більшим за розміри випромінювача (рис.2.21 в) коливальні швидкості майже на порядок більші ніж при однакових (рис.2.21 а) або в п'ять разів більших (рис.2.21 г) за розміри випромінювача на одних і тих самих частотах. Таким чином, є певні розміри екрану, при яких енергетичну ефективність механічних полів випромінювачів в круговій антені з екраном можна суттєво підвищити при круговому випромінюванні, не збільшуючи при цьому напругу їх електричного збудження. Цю обставину необхідно враховувати при виконанні проектних робіт по досліджуваним типам антен. І, по-четверте, майже у всіх випадках амплітуди коливальних швидкостей з боку екрану більші ніж з протилежного. При цьому їх фази (рис.2.21 б) в залежності від частоти можуть бути однаковими, або протилежними між собою.



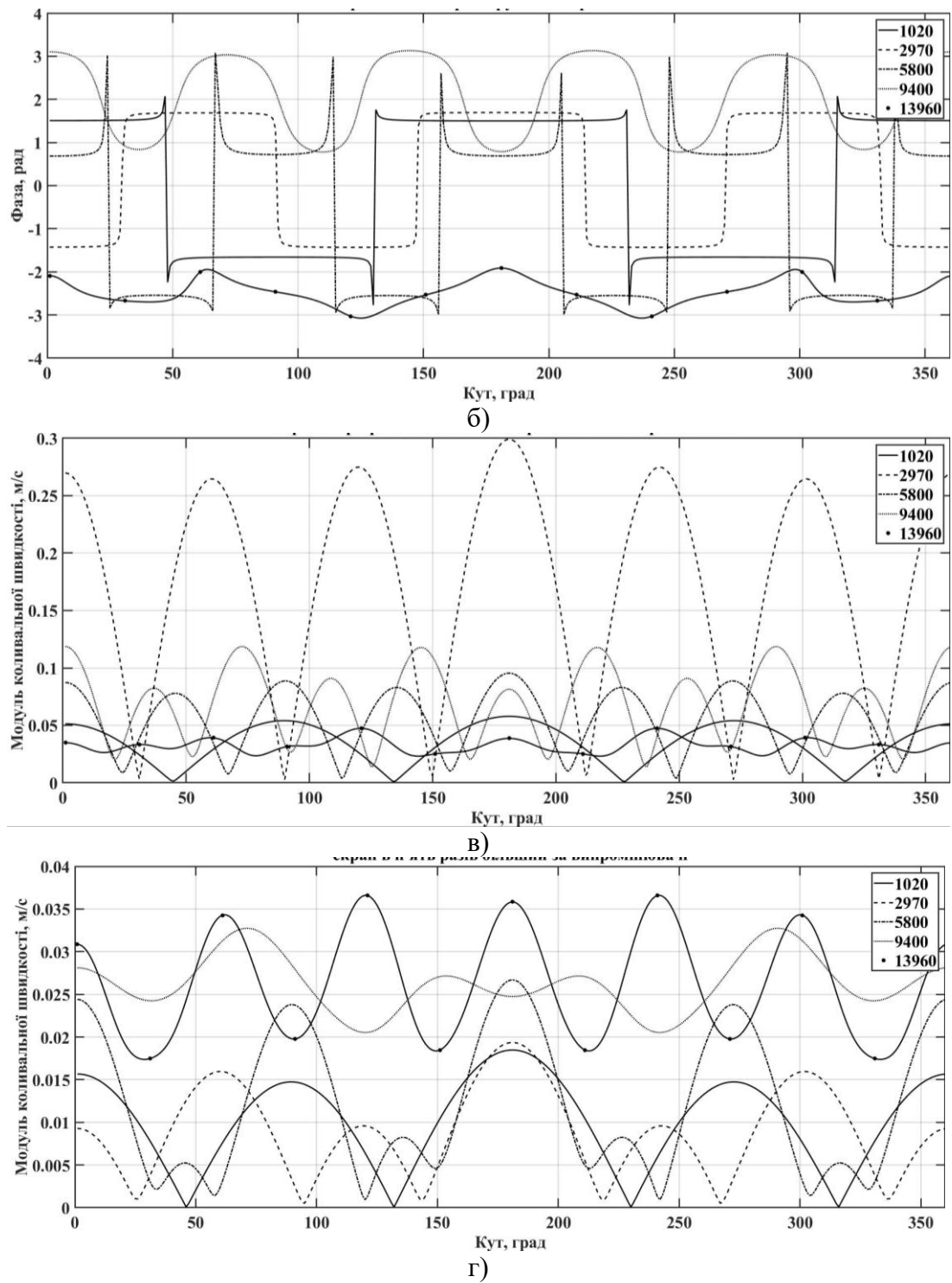


Рис.2.21 Кутовий розподіл амплітуд (а, в, г) та фаз (б) коливної швидкості на поверхнях випромінювачів трьохелементних антен з екранами радіусом  $r_{0N+1} = r_0(a, б); 3 \cdot r_0(в); 5 \cdot r_0(г)$  при рівномірному випромінненні на різних частотах

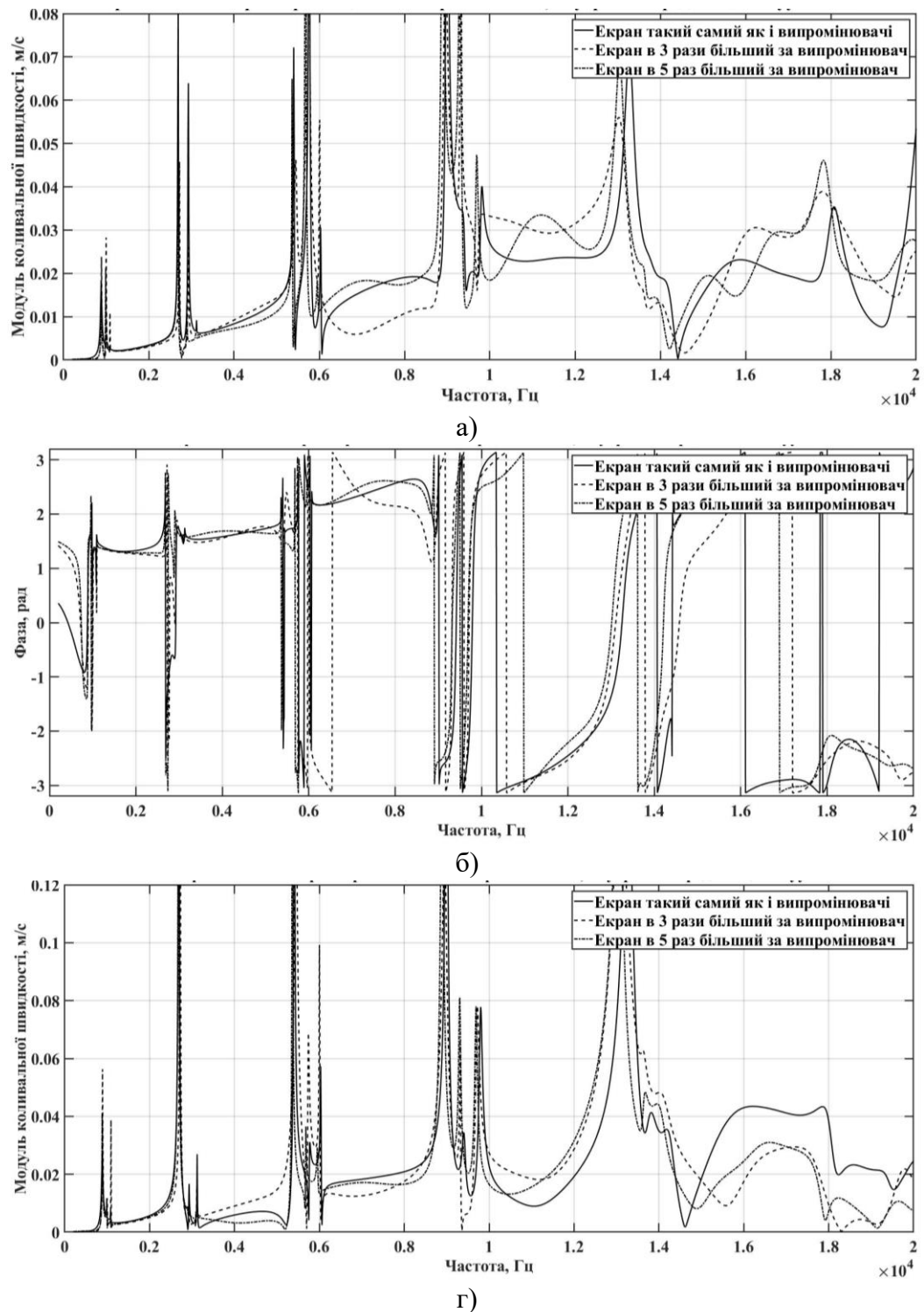
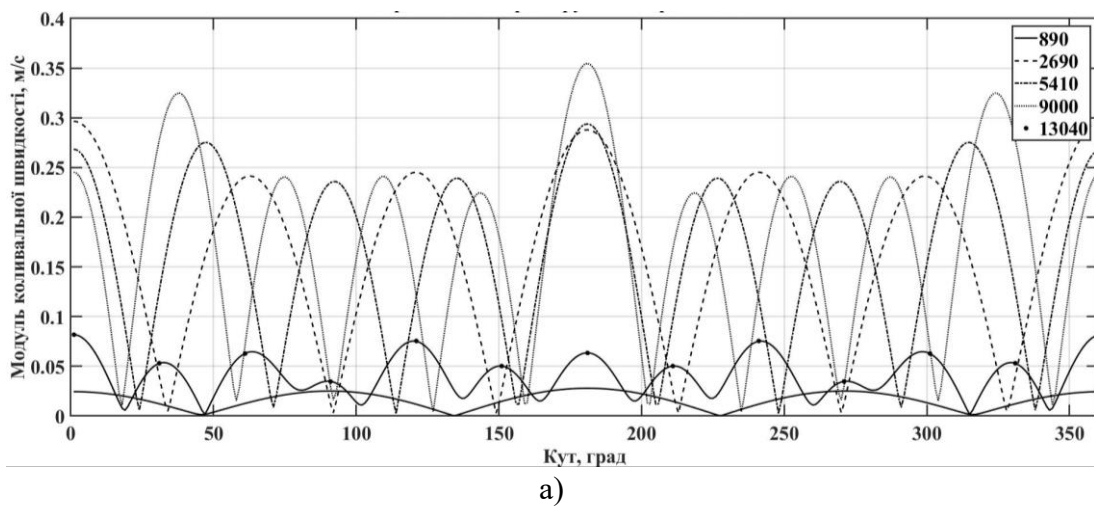
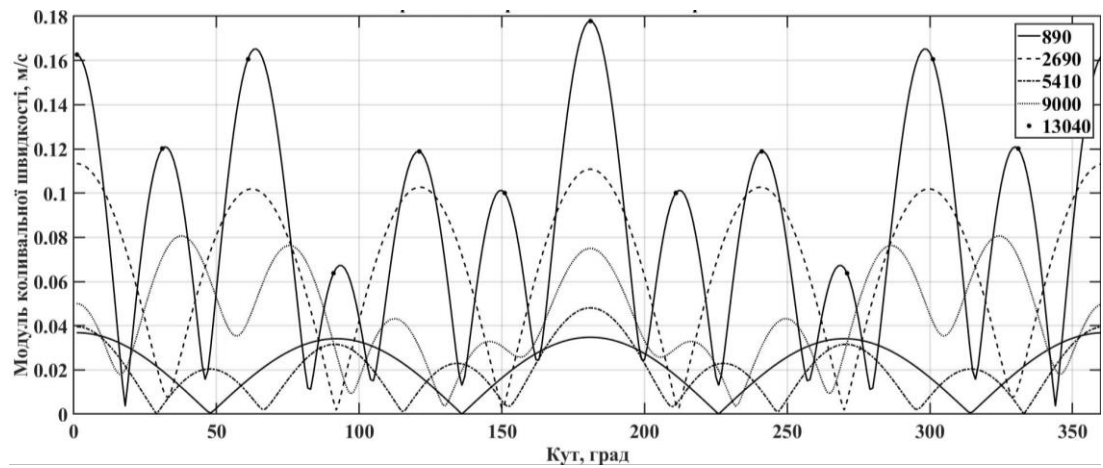


Рис.2.22 Частотні залежності амплітуд (а, в) та фаз (б) коливальної швидкості поверхонь крайніх (а, б) та середнього (в) випромінювачів трьохелементної антени з екранами різних розмірів і секторним випроміненням

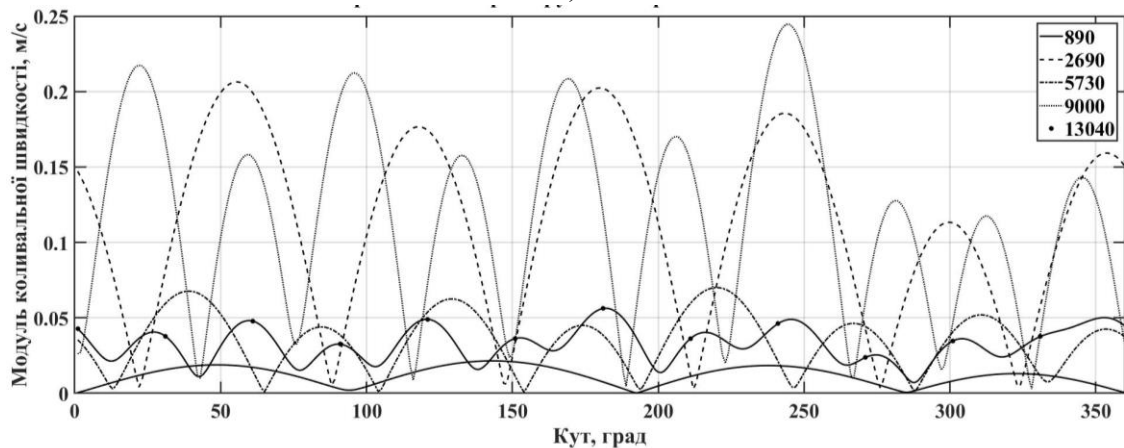
При зміні режиму випромінення кругової антени з екраном з кругового на секторний змінюється і залежність механічних полів випромінювачів від розмірів екрана. Аналіз графіків рис.2.22 та співставлення їх із графіками рис.2.20 свідчить про наступне. По-перше, залежність механічних полів випромінювачів змінюється при зміні місця розташування випромінювача в робочому секторі. Ці зміни

полягають в різних значеннях додаткових власних резонансів крайніх і середніх випромінювачів у всіх частотних областях і різній формі частотних залежностей. По-друге, збільшення розмірів екрану обумовлює зсув частот додаткових власних резонансів в низькочастотній області в бік більших значень, в резонансній і високочастотній областях – в бік менших значень. По-третє, збільшення розмірів екрану супроводжується зменшенням амплітудних значень механічних полів випромінювачів, причому, для крайніх випромінювачів в більшій мірі (рис.2.22 а, в). Перехід до секторного випромінювання в кругових антенах з екраном змінює і кутові залежності амплітуд і фаз коливальних швидкостей від розмірів екрану (рис.2.23). При цьому встановлені для кругового випромінювання закономірності змін кутових розподілів амплітуд коливальних швидкостей зберігаються, але з'являється їх відмінність між собою для середніх і крайніх випромінювачів робочого сектора кругової антени. Крім того при секторному випромінюванні збільшення розмірів екрану обумовлює зменшення амплітуд коливальних швидкостей без будь-яких особливостей. Це характерно як для середніх (рис.2.23 а, б), так і для крайніх (рис.2.23 в, г) випромінювачів сектора.

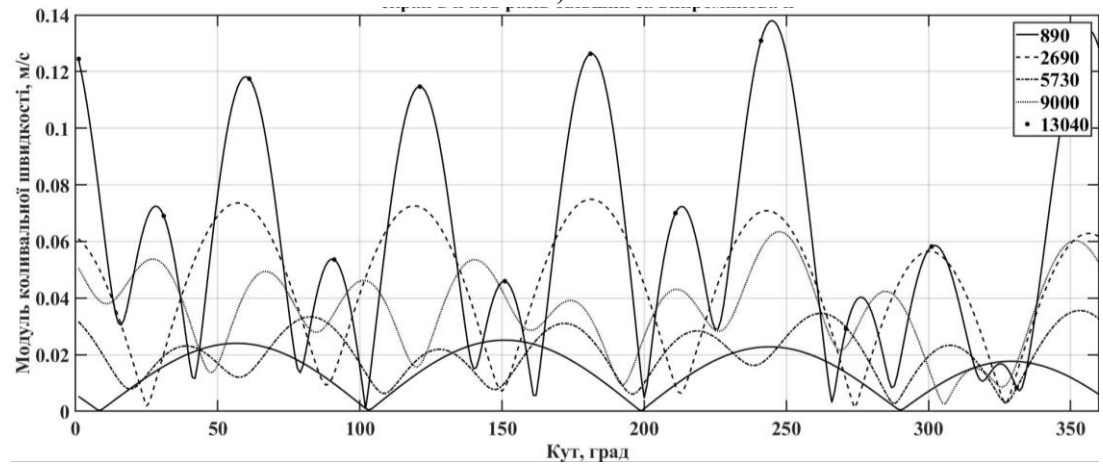




б)



в)



г)

Рис.2.23 Кутовий розподіл амплітуд коливної швидкості поверхонь середніх (а, б) та крайніх (в, г) випромінювачів трьохелементної антени з екраном різних розмірів і секторним випроміненням

Перейдемо тепер до визначення властивостей механічних полів кругових антен з екраном при зміні такої характеристики конструкцій антен як кількість випромінювачів в них. Аналіз графіків рис. 2.20 та 2.24 свідчить про те, що при рівномірному випромінненні круговими антенами з екраном збільшення кількості випромінювачів в антені з екраном мало впливає на частотні залежності амплітуди

коливальної швидкості в низькочастотній області. Власні частоти додаткових резонансів та їх кількість майже не змінюється. Характер поведінки частотних залежностей в цій області теж однаковий. Змінюються лише амплітуди коливальних швидкостей нових резонансів, зростаючи при збільшенні кількості випромінювачів в антені. Така частотна поведінка випромінювачів в цій області обумовлена тим, що при зниженні частоти власний механічний імпеданс п'єзокерамічних оболонок випромінювачів швидко збільшується. В той же час хвильовий розмір оболонок зменшується, що обумовлює падіння їх імпедансу випромінення. Завдяки цьому ефект акустичної взаємодії випромінювачів є незначним і коливальні швидкості визначаються власними механічними імпедансами випромінювачів. Тому має місце випромінення амплітуд коливальних швидкостей. Зовсім інша ситуація має місце в резонансній області. Для цієї області власні механічні резонанси п'єзокерамічних оболонок випромінювачів є суміжними з імпедансами їх випромінення. Тому реакція середовища і обмін акустичною енергією між елементами антени по зовнішньому полю суттєво збільшуються. Наслідком цього є суттєві зміни частотних залежностей амплітуд коливальних швидкостей випромінювачів антени з екраном в цій області при зміні кількості випромінювачів. В високочастотній області має місце збільшення імпедансу випромінення зі збільшенням частоти, завдяки чому акустична взаємодія випромінювачів в антені зростає порівняно з низькочастотною областю.

Аналіз графіків рис.2.3 та 2.25 свідчить про те, що при рівномірному випроміненні звуку збільшення кількості випромінювачів в круговій антені з екраном мало змінює ті закономірності в кутових розподілах коливальних швидкостей на поверхнях випромінювачів, які були встановлені раніше. Зміни полягають в зменшенні нерівномірності розподілу амплітуд коливальних швидкостей по поверхнях випромінювачів антени.

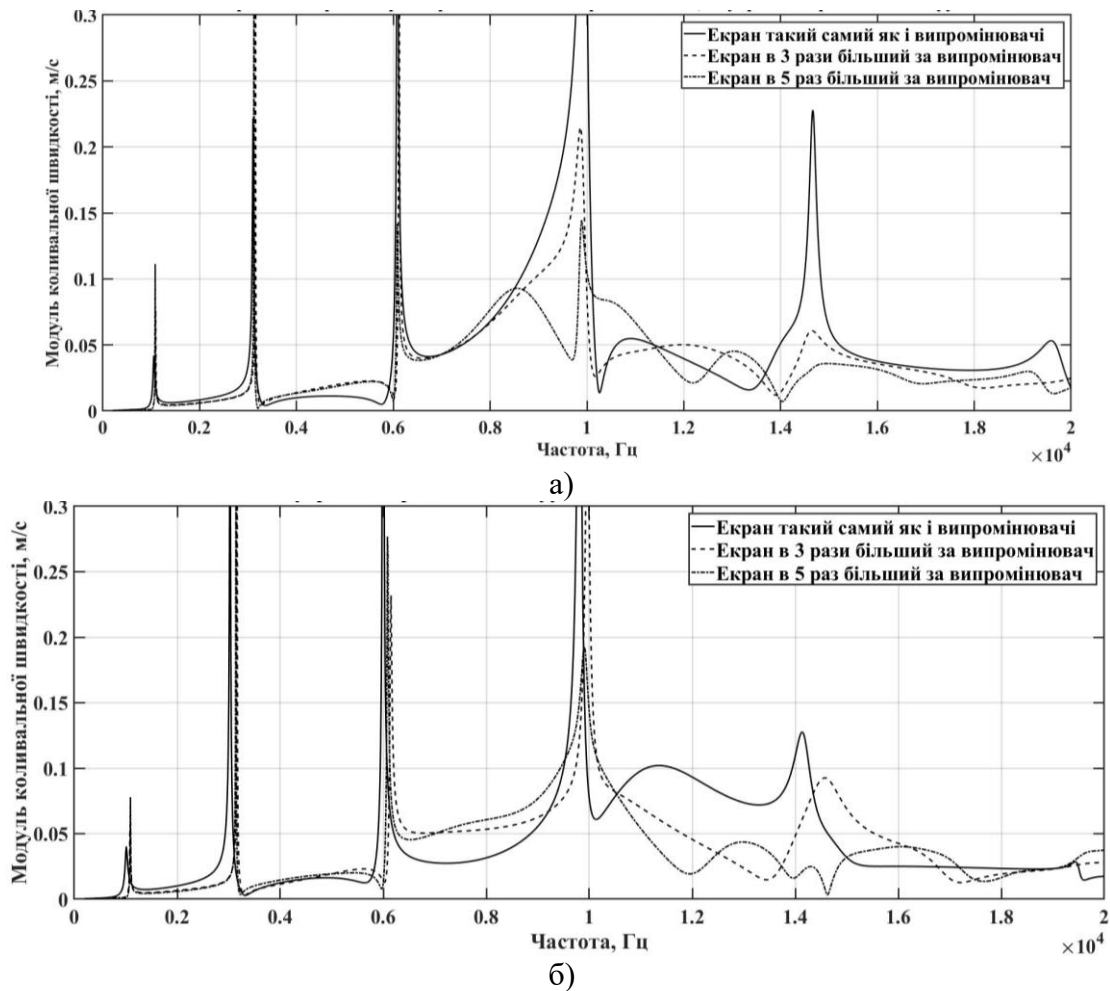


Рис.2.24 Частотні залежності амплітуд коливальної швидкості поверхонь випромінювачів п'ятиелементної (а) та шестиелементної (б) з екраном при рівномірному випромінненні

Дослідимо тепер, який вплив здійснює збільшення кількості випромінювачів в

круговій антені з екраном на характеристики їх механічних полів при секторному випромінненні звуку. Аналіз графіків рис. 2.6 та 2.26 свідчить про наступне. Як і при рівномірному випромінненні, основні зміни відносяться до резонансної та високочастотної областей. В цих областях з'являється значна кількість нових власних механічних резонансів. Амплітуди і частоти цих резонансів в значній мірі залежать від місця розташування випромінювача в секторі. В той самий час в низькочастотній області амплітуди і частоти додаткових власних резонансів практично мало змінюються для кругових антен з екраном як зі зміною кількості випромінювачів в антені, так і з режимом їх випроміннення. Фізичні причини наведених особливостей були викладені вище. Дійсно, оскільки в резонансній і високочастотній областях взаємодія елементів антени по зовнішньому акустичному полю стає вирішальним фактором в формуванні фізичних полів антени та її елементів, то збільшення кількості випромінювачів в антені при малих відстанях

між ними збільшує можливості по обміну енергією випромінених і багатократно відбитих хвиль між ними. Наслідком цього і є суттєве ускладнення частотних залежностей амплітуд і фаз коливальних швидкостей досліджуваної системи.

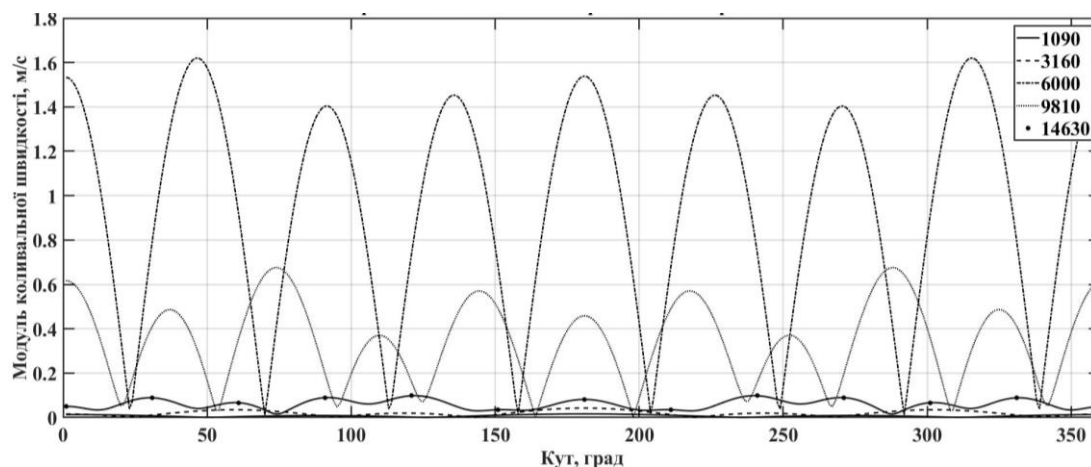
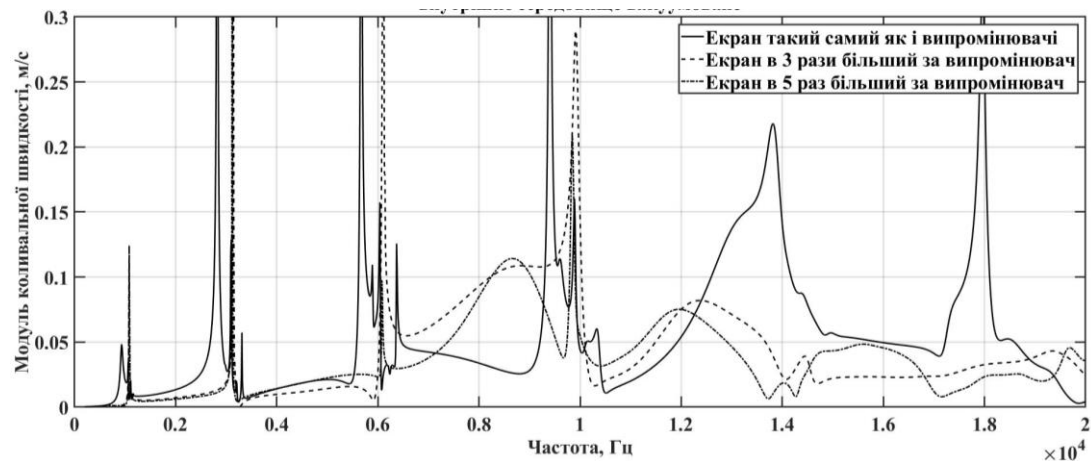
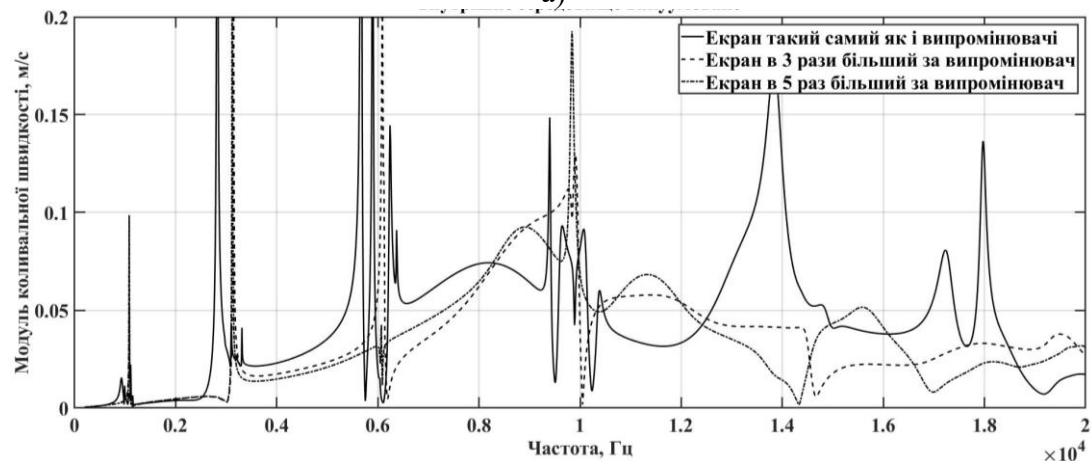


Рис. 2.25 Кутовий розподіл амплітуд коливальної швидкості на поверхні випромінювачів шестиелементної антени з екраном при рівномірному випромінненні і  $r_{0N+1} = 5 \cdot r_0$

Ускладнюються в цих областях не лише частотні, а й кутові залежності амплітуд і фаз коливальної швидкості на поверхнях випромінювачів кругової антени з екраном



а)





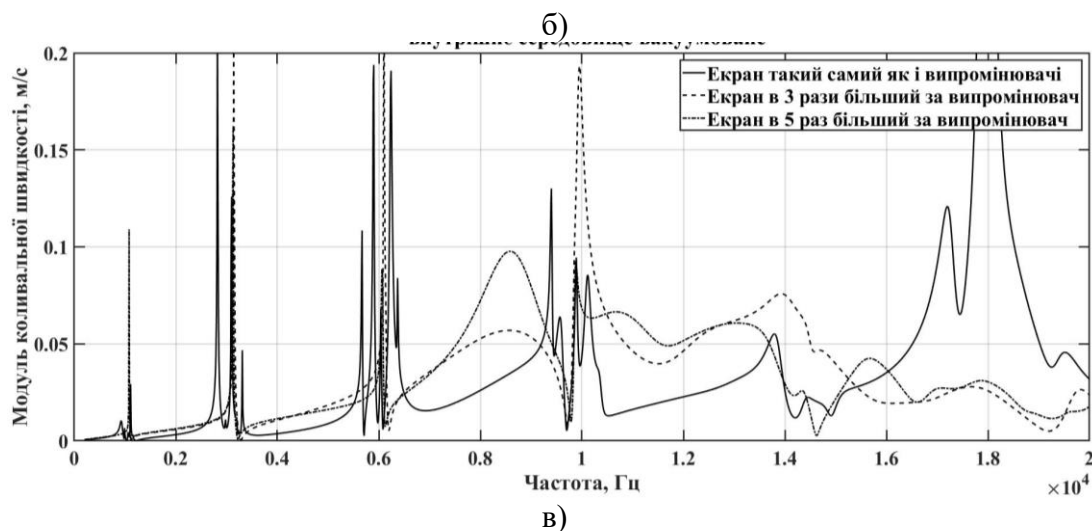


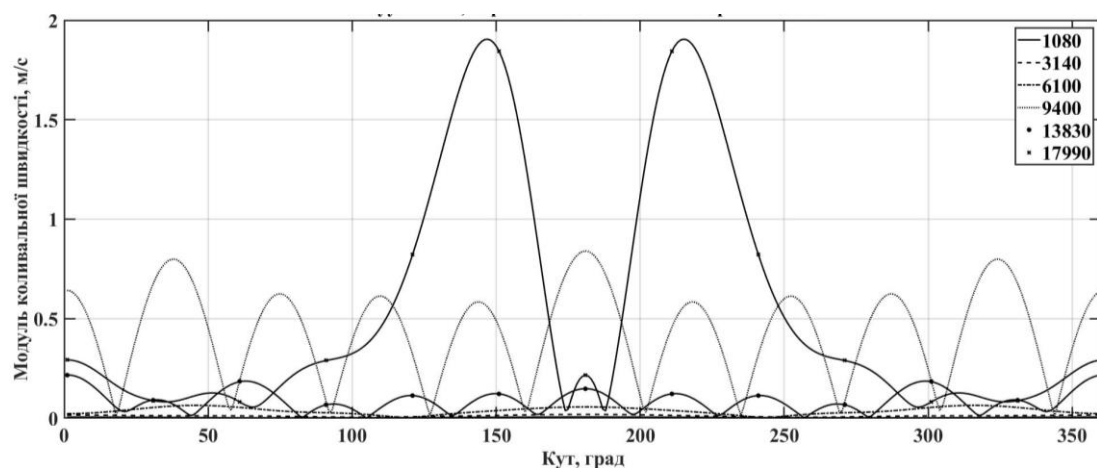
Рис. 2.26 Частотні залежності амплітуд коливальної швидкості поверхонь середнього (а), проміжних (б) та крайніх (в) випромінювачів шестиелементної антени з екраном при секторному випромінненні.

при збільшенні в секторі кількості випромінювачів. Про це свідчить аналіз кривих рис. 2.8 та 2.27. Перш за все звернемо увагу на суттєву залежність кутових розподілів коливальної швидкості від місця розташування випромінювача в робочому секторі антени.

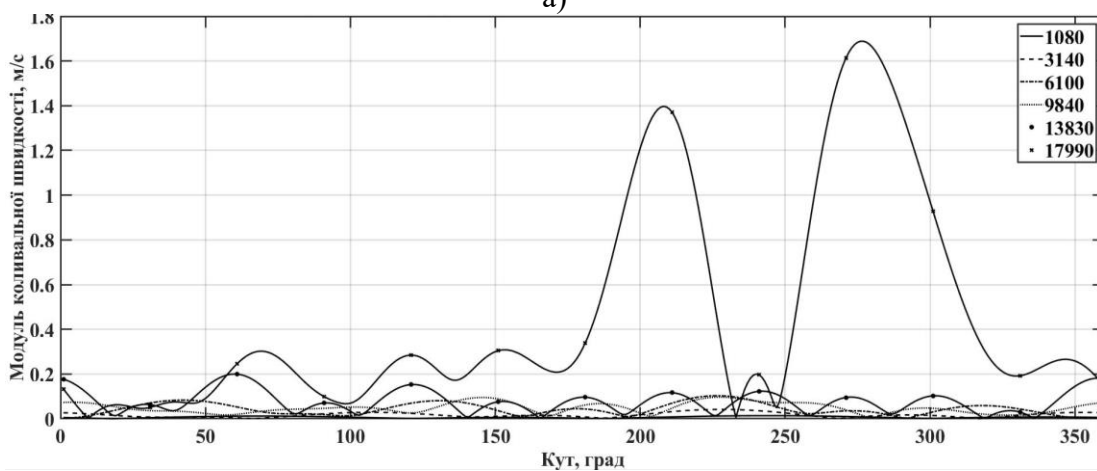
Для центрального випромінювача сектора (рис. 2.27 а) кутовий розподіл коливальної швидкості є симетричним відносно променю  $O_3O_6$  (рис. 1. 1) для всіх частот. При цьому в більшості випадків рівень коливальної швидкості з боку екрану є мінімальним. На одній з частот власного механічного резонансу (1080 Гц) розподіл коливальної швидкості являє собою дві симетрично розміщені однакові пелюстки, розділені мінімальними амплітудами в секторі  $180^\circ \pm 10^\circ$ . Цікаво відзначити, що максимуми цих пелюсток знаходяться з боку екрану антени. При переході проміжних (рис. 2.27 б) і крайніх (рис. 2.27 в) випромінювачів робочого сектора на цій резонансній частоті розподіл коливальної швидкості втрачає свою симетрію. Спочатку (рис. 2.27 б) одна з пелюсток значно зменшується порівняно з іншою, а у випадку крайніх (рис. 2.27 в) випромінювачів зникає зовсім. Крім того вона переходить з півсфери, що прилягає до екрану антени, в півсферу, протилежну йому. Слід також зауважити, що збільшення кількості випромінювачів в робочому секторі кругової антени з екраном зменшує нерівномірність кутових розподілів коливальної швидкості цих випромінювачів (рис. 2.8 і 2.27).

Однією із важливих характеристик конструкції кругових антен з екраном є відстань між елементами антени. Особливо ця характеристика відіграє визначальну роль в тих випадках, коли розміри елементів антени порівняні з довжиною їх робочих хвиль. Саме при цих розмірах має місце найбільш ефективний обмін акустичними енергіями між елементами антен, обумовлений їх взаємодією з випроміненими і відбитими звуковими хвилями. Саме відстань між елементами антени визначає в кількісному відношенні рівень їх акустичної взаємодії при формуванні фізичних полів антени.

Аналіз фізичного змісту матричних елементів аналітичних співвідношень (1. 22) показує, що подвійні суми в них описують акустичну взаємодію між собою по зовнішньому полю  $s$ -го та  $q$ -го елементів кругових антен з екраном



а)



б)

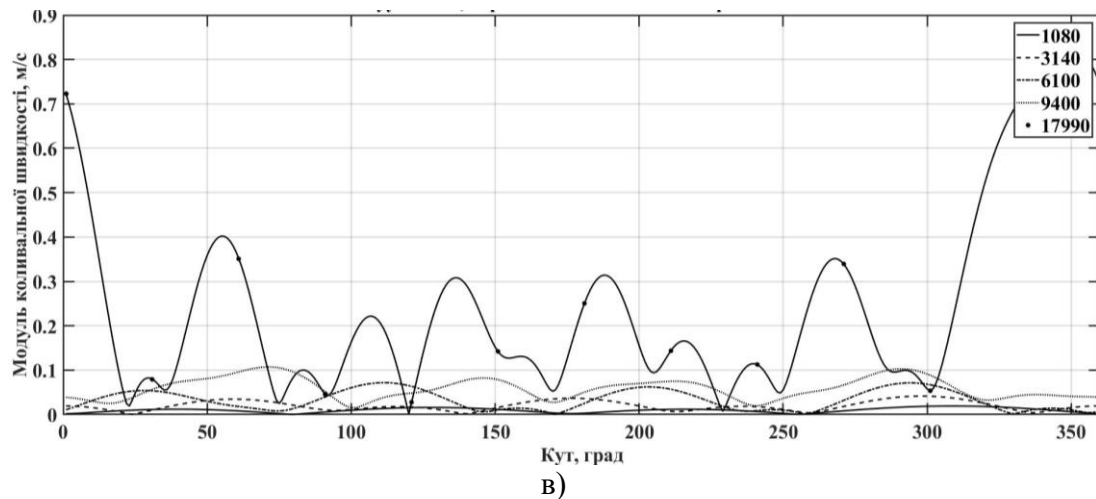
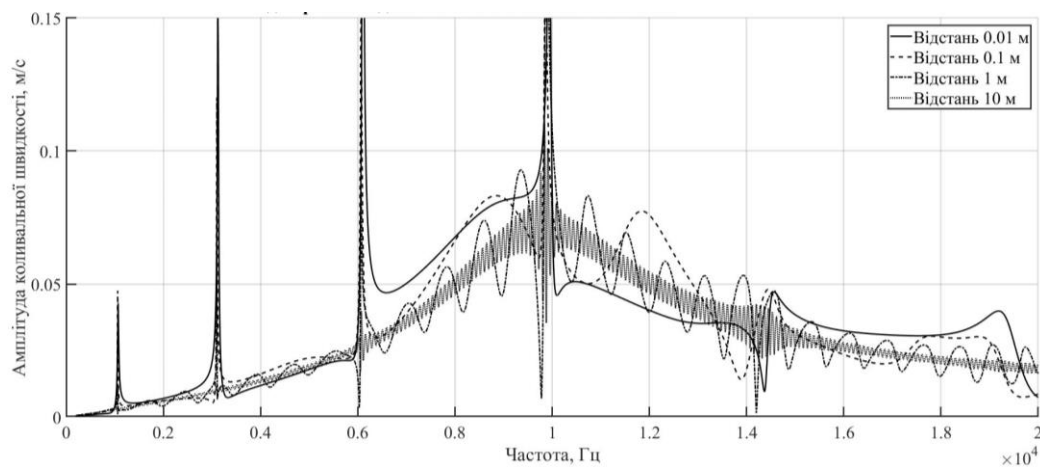
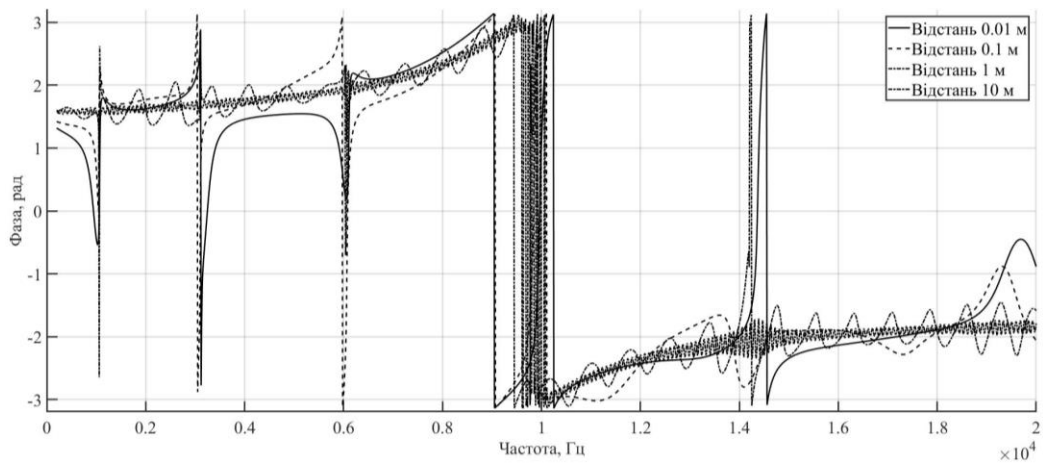


Рис.2.27 Кутовий розподіл амплітуд коливної швидкості на поверхнях середнього (а), проміжних (б) і крайніх (в) випромінювачів шестиелементної антени з екраном при секторному випромінненні.

( $s = 1, \dots, N + 1; q = 1, \dots, N + 1; s \neq q$ ). Множники  $H_{m-n}^{(1)}(kr_{qs})e^{i(m-n)\varphi_{qs}}$  визначають в кількісному відношенні рівень цієї взаємодії. Вони описують взаємодію звукових хвиль  $m$ -го та  $n$ -го порядків, на частоті  $\omega$ , створених  $s$ -м та  $q$ -м елементами антен, які рознесені між собою на відстань  $r_{qs}$ . Їх аналіз показує, що при збільшенні хвильової відстані  $kr_{qs}$  величина  $|H_{m-n}^{(1)}(kr_{qs})|$  зменшується, а відтак, знижується акустична взаємодія  $s$ -го та  $q$ -го елементів антени. При  $H_{m-n}^{(1)}(kr_{qs}) \rightarrow 0$ , що має місце коли  $kr_{qs}$  прямує до нескінченності, акустична взаємодія елементів антени зникає і кожен з них в антені веде себе як окремий самостійний елемент. Зауважимо, що множник  $e^{i(m-n)\varphi_{qs}}$  визначається конфігурацією антени.



а)



б)

Рис.2.28 Частотні залежності амплітуд (а) і фаз (б) коливальної швидкості випромінювачів чотирьохелементної антени з екраном при рівномірному випромінненні і різних відстанях між поверхнями екрану і випромінювачів.

Дослідимо тепер кількісну залежність механічних полів випромінювачів кругової антени з екраном від відстані між її елементами. Аналіз кривих рис.2.29 свідчить про те, що в чотирьох елементній антені з екраном і рівномірним випромінненням збільшення відстані між елементами антени суттєво впливає, як це і було встановлено теоретичним аналізом, на частотні характеристики амплітуд і фаз коливальної швидкості випромінювачів антени. Частотні залежності амплітуд і фаз коливальної швидкості при збільшенні відстаней між елементами антени поступово втрачають свої генеровані при малих відстанях додаткові власні механічні резонанси. Ці втрати відбуваються у всіх частотних областях – низькочастотній, резонансній і високочастотній. При великих відстанях між елементами антени середні значення частотних залежностей амплітуд і фаз коливальної швидкості випромінювачів у складі антени при рівномірному випромінненні набувають форми частотних залежностей одиночних випромінювачів при роботі їх поза антеною. Про наявність інших елементів

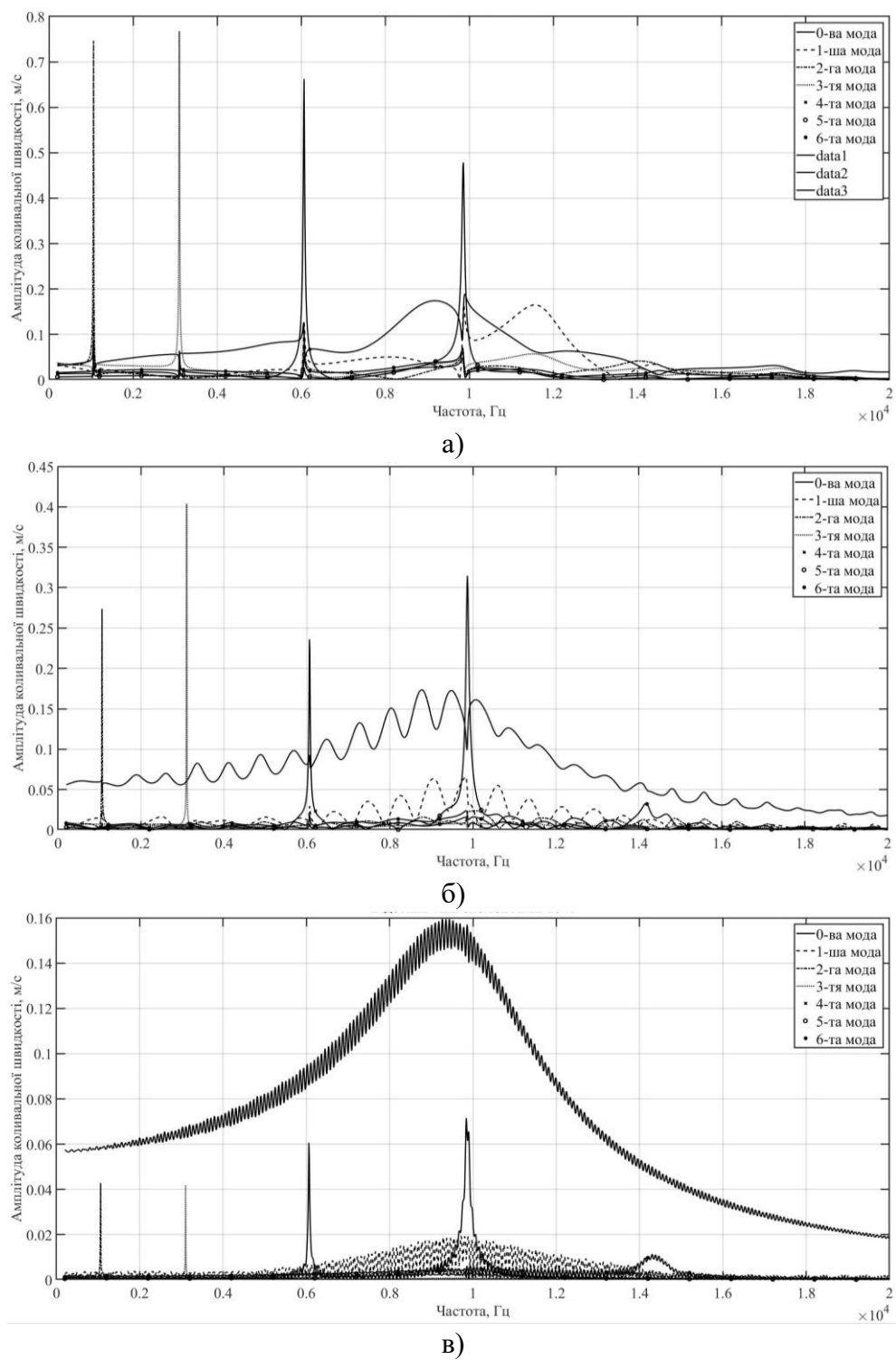


Рис.2.29 Частотні залежності амплітуд мод коливальної швидкості при рівномірному випромінненні чотирьохелементної антени з екраном і відстанями між поверхнями екрану і випромінювачів, рівних 0,1 м (а); 1 м (б); 10 м(в).

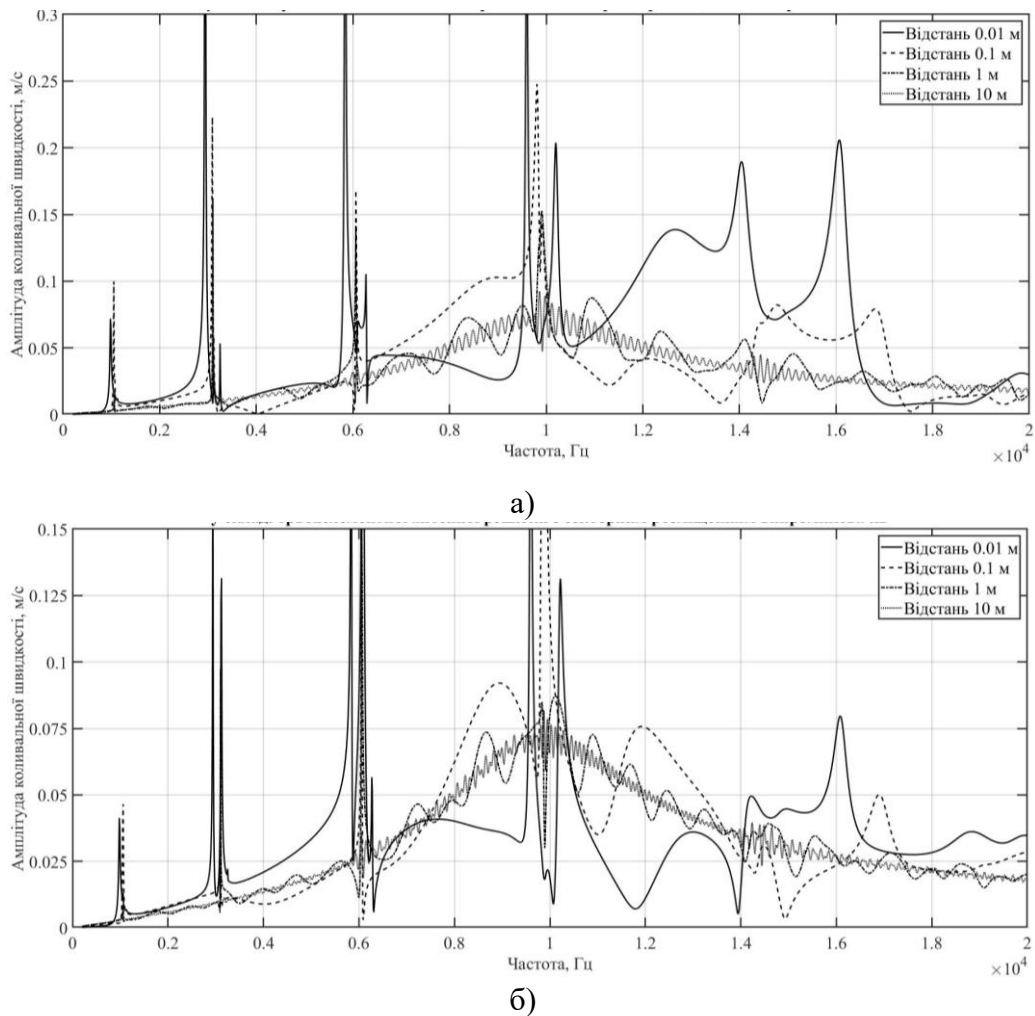


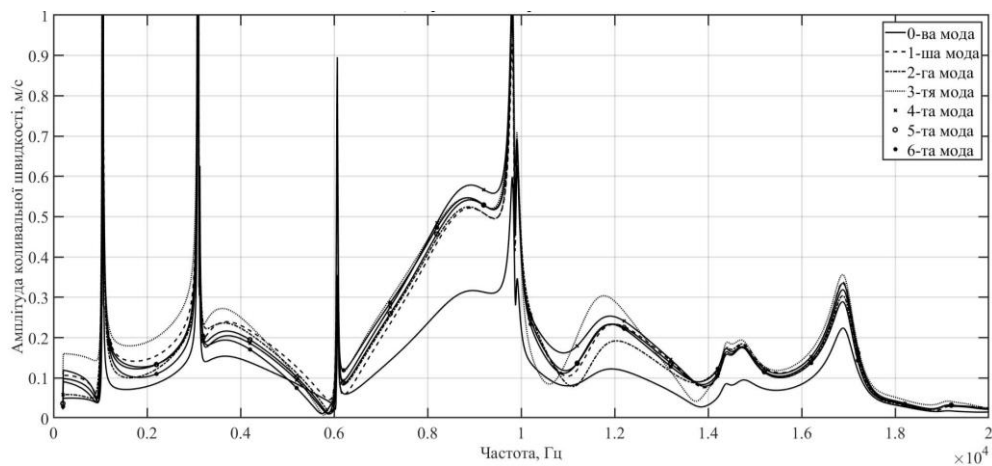
Рис.2.30 Частотні залежності амплітуд коливальної швидкості центральних (а) і крайніх (б) випромінювачів чотирьохелементної антени з екраном і секторним випроміненням при різних відстанях між поверхнями випромінювачів і екрану

у складі кругової антени з екраном навіть при великих відстанях між її елементами свідчить наявність багатократних осциляцій амплітуд і фаз навколо форм частотних залежностей одиночного випромінювача. Саме наявність цих осциляцій є свідченням того, що взаємодія елементів у складі антени по акустичному полю в зовнішньому середовищі антени фізично обумовлена багатократним відбиттям звукових хвиль, генерованих випромінювачами антени, від елементів антени зі своїми амплітудами і фазами. Кількісні значення останніх визначаються відстанню між елементами антени, властивостями екрану, конфігурацією антени, номером відбитої звукової хвилі та її частотою. В кінцевому результаті багатомодовість випромінювачів, набута ними у складі антени завдяки акустичній взаємодії елементів антени між собою у зовнішньому просторі антени, втрачається при збільшенні відстані між елементами антени і циліндричні п'єзокерамічні

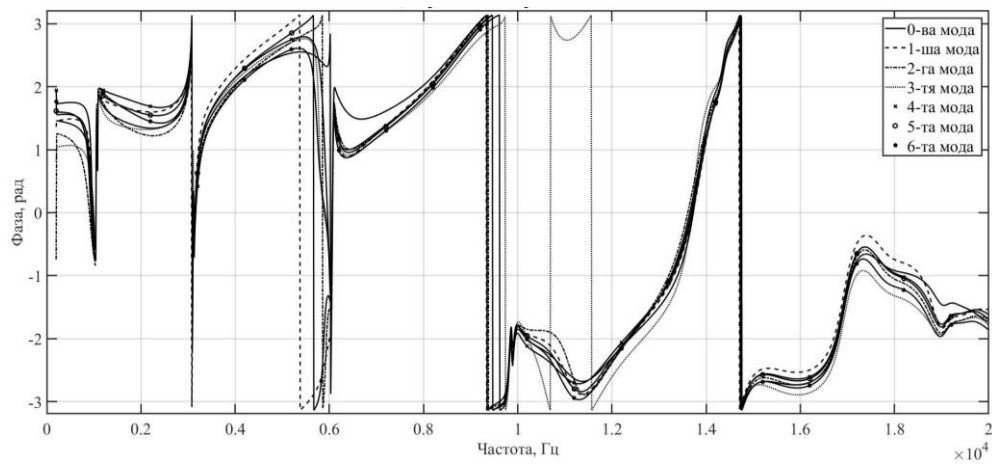
перетворювачі стають одномодовими у складі кругової антени з екраном при великих відстанях між її елементами. Поступовість цього процесу, пов'язана з хвильовою відстанню між елементами антени, демонструють криві рис. 2.29. Вони показують, як при рівномірному випромінненні звуку і зменшенні акустичної взаємодії елементів антени, нульова мода в механічному полі випромінювачів поступово набуває ту форму, амплітуду і фазу, які характерні для самостійної роботи

одиначного

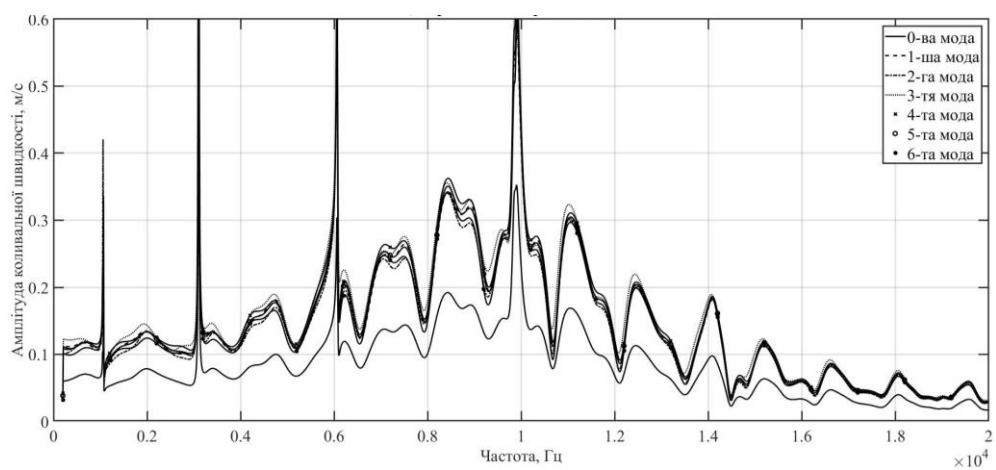
циліндричного



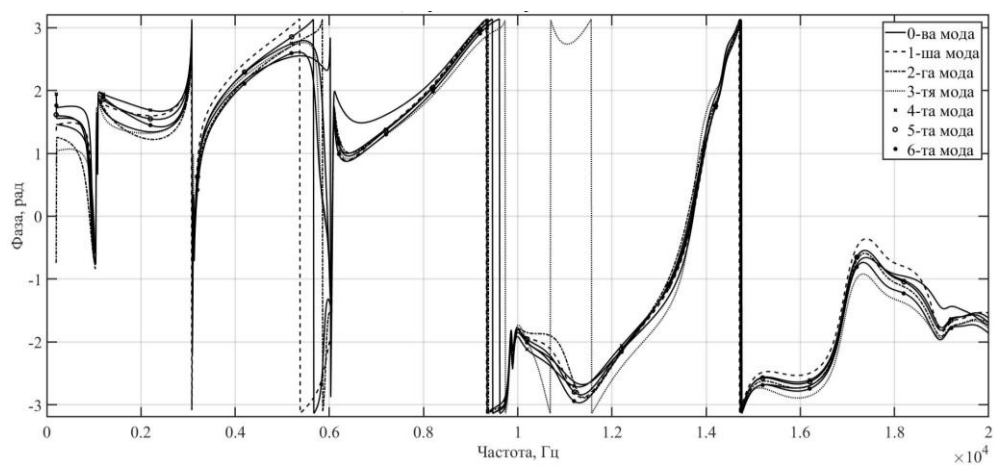
а)



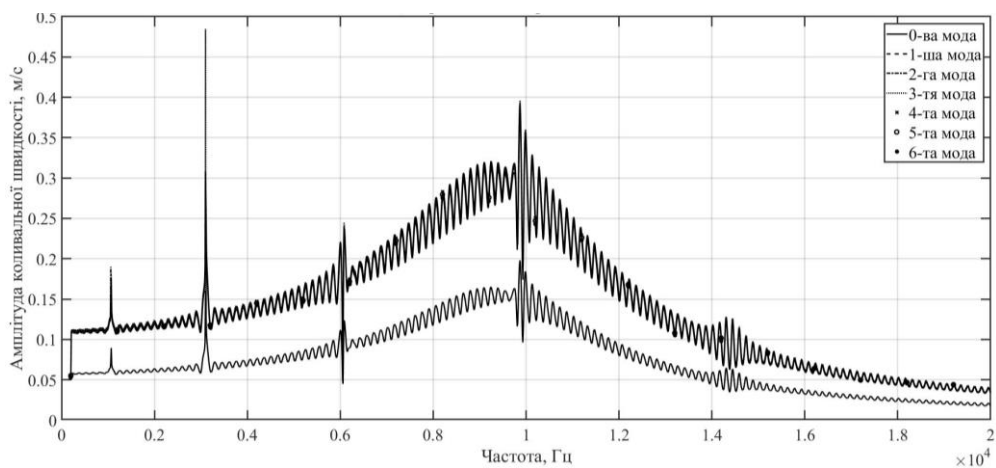
б)



В)

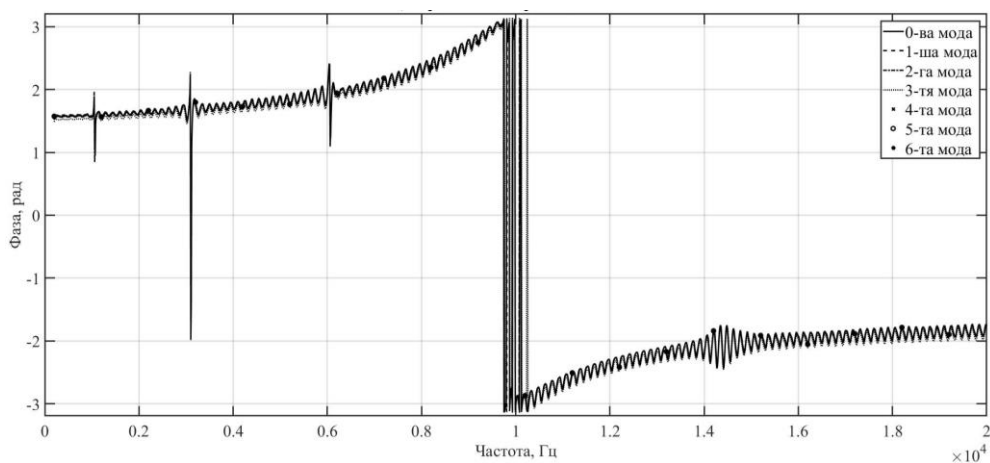


Г)



Д)





е)

Рис.2.31 Частотні залежності амплітуд (а, в, д) і фази (б, г, е) мод коливальної швидкості центральних випромінювачів чотирьохелементної антени з екраном і секторним випроміненням при різних відстанях між елементами.

п'єзокерамічного випромінювача при його радіально симетричному електричному збудженні. Ці ж рисунки демонструють і поступове згасання коливальних швидкостей заново генерованих наступних за нульовою модою коливань в механічних полях випромінювачів антени.

Описані вище процеси відбуваються в механічних полях випромінювачів кругових антен з екранами і з секторним випроміненням при збільшенні відстаней між елементами антен (рис. 2.30 і 2.31).

Аналіз графіків рис. 2.30 показує, що при збільшенні відстаней залежність частотних характеристик амплітуд і фаз коливальних швидкостей випромінювачів від місця розташування їх в випромінюючому секторі поступово зникає. При великих відстанях ( $\sim 10\text{м}$ ), як і у випадку антен з рівномірним випроміненням, частотні залежності випромінювачів у складі стають однаковими і такими ж, як і у одиночних випромінювачів. Осциляції значень амплітуд і фаз відносно їх середніх значень зменшуються при збільшенні значень  $kR_0$ , повністю зникаючи при  $kR$ , близькому до нескінченності. Таким чином і при секторному випроміненні кругової антени з екраном зменшення акустичної взаємодії елементів антени при збільшенні відстаней між ними є фізичною причиною втрати випромінювачами набутої ними в антені властивості багатомодовості і повернення до одномодовості. Поступовість втрати випромінювачами цієї набутої ними властивості у складі антени на прикладі

центрального випромінювача робочого сектора антени при збільшенні величини  $kR_0$  демонструють графіки рис. 2.31.

## **Висновки до розділу 2**

Методом чисельного експерименту на основі отриманих в розділі 1 співвідношень, що описують механічні поля кругових антен з екраном, проведене дослідження цих полів для різних випадків конструктивного виконання, як випромінювачів у складі антени, так і конструктивного виконання антени в цілому. В якості досліджуваного параметра механічних полів використовувалася коливальна швидкість (її модуль та фаза) на поверхні випромінювача.

Дослідження механічних полів проводилися для наступних ситуацій:

- Матеріал п'єзокерамічної оболонки (ЦТБС-3, ЦТС-19 та ТБК-3);
- Різна поляризація матеріалу оболонки (окружна або радіальна);
- Різне заповнення внутрішнього середовища випромінювачів (вакуум, повітря, вода, 0,3, 0,5 або 0,7 від хвильового опору води);
- Різна кількість випромінювачів в антені (3, 4 або 5);
- Різні режими роботи антени (кругове або секторне увімкнення випромінювачів);
- Різні відстані між поверхнями випромінювачів та екрану в антені (0,1; 1 або 10 м).

Дослідження описаних вище ситуацій дозволило виявити ефекти, що виникають в результаті взаємодії випромінювачів у складі антени, дослідити причини їх виникнення та вплив описаних вище ситуацій на поведінку виявлених вище ефектів.

## **РОЗДІЛ 3. ВЛАСТИВОСТІ АКУСТИЧНИХ ПОЛІВ КРУГОВИХ ГІДРОАКУСТИЧНИХ АНТЕН З ЕКРАНОМ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ОСОБЛИВОСТЕЙ КОНСТРУКТИВНОГО ВИКОНАННЯ АНТЕН ТА ЇХ ЕЛЕМЕНТІВ**

### **3.1 Параметри акустичних полів, що досліджуються**

Кінцевим результатом функціонування будь-якої системи г/а випромінювачів є створення нею в оточуючому середовищі акустичного поля з наперед заданими його характеристиками та параметрами. В залежності від вимог, які пред'являють до випромінюючого г/а тракту, до складу якого входить антенна решітка, ці

характеристики поділяють на локальні та інтегральні. В свою чергу локальні характеристики поділяють на характеристики ближнього та дальнього акустичних полів. В ближньому полі значення амплітуд звукового тиску визначають кавітаційні можливості г/а антени. Крім того, знання амплітуди і фази акустичного тиску на поверхнях випромінювачів антени є необхідним елементом при визначенні таких інтегральних характеристик антен як їх акустична потужність та опір випромінення.

В дальньому полі антени важливою її характеристикою є кутовий розподіл в оточуючому просторі значень амплітуд (амплітудна характеристика направленості) та фаз (фазова характеристика направленості) звукового тиску. Через них визначаються і такі важливі енергетичні характеристики антени як її коефіцієнти концентрації – осьовий і в заданому напрямі.

Таким чином, знання акустичного тиску, створюваного г/а антеною в будь-якій точці робочого простору, дозволяє визначити кількісні значення будь-якої характеристики антени, важливої з точки зору її роботи у складі ехолокаційної системи. Тому в подальшому в якості досліджуваних параметрів кругової циліндричної г/а антени з екраном приймаємо:

- частотні залежності амплітуд та фаз акустичного тиску в звукових полях, створюваних як антенами, так і випромінювачами у їх складі;
- кутові залежності цих амплітуд та фаз для частот, які будуть визнані в процесі дослідження такими, що представляють інтерес.

Оскільки в попередніх розділах основна увага приділялася визначенню потенціалів швидкості акустичних полів, які пов'язані з акустичним тиском  $p$  виразом  $p = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t}$ , то з урахуванням виразів (1. – 1. ) співвідношення для тиску набувають вигляду:

- у ближньому полі кожного із випромінювачів:

$$P_1^{(s)}(r_s, \varphi_s) = -i\omega\rho_1 \left[ A_n^{(s)} H_n^{(1)}(kr_s) e^{in\varphi_s} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq s}}^M \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m^{(q)} J_m(kr_s) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qs}) e^{i(m-n)\varphi_{qs}} e^{im\varphi_s} \right], \quad (2.1)$$

$$s = 1, \dots, M, \quad r_{1s} < r_s, \quad 0 < |\varphi_s| < \pi.$$

– у внутрішньому об'ємі кожного з випромінювачів:

$$P_2^{(s)}(r_s, \varphi_s) = -i\omega\rho_2^{(s)} \left[ B_n^{(s)} J_n^{(1)}(kr_s) e^{in\varphi_s} \right], s=1, \dots, M, r_{1s} < r_s, 0 < |\varphi_s| < \pi. \quad (2.2)$$

– у дальньому полі кожного із випромінювачів:

$$P_D^{(s)}(\varphi) = -i\omega\rho \left( \frac{2}{\pi kr} \right)^{1/2} e^{i\left(-\frac{\pi}{4} + kr\right)} \left[ e^{-ikr_0 \cos(\varphi - \varphi_0(s-1))} \sum_n A_n^{(s)} e^{-i\frac{\pi}{2}n} e^{in\varphi} + \sum_n A_n^{(N+1)} e^{-i\frac{\pi}{2}n} e^{in\varphi} \right] \quad (2.3)$$

– у дальньому полі антенної решітки:

$$P_D(\varphi) = -i\omega\rho \left( \frac{2}{\pi kr} \right)^{1/2} e^{i\left(-\frac{\pi}{4} + kr\right)} \left[ \sum_{s=1}^N e^{-ikr_0 \cos(\varphi - \varphi_0(s-1))} \sum_n A_n^{(s)} e^{-i\frac{\pi}{2}n} e^{in\varphi} + \sum_n A_n^{(N+1)} e^{-i\frac{\pi}{2}n} e^{in\varphi} \right] \quad (2.4)$$

Вирази (2.3) і (2.4) отримані із виразів (2.1) і (1. ) шляхом перетворення їх із застосуванням асимптотичних уявлень для функцій Ханкеля при  $r_s \gg r_0$  [43], та справедливості допущень:

$$r_s = \begin{cases} r - r_0 \cos[\varphi - \varphi_0(S-1)], S \leq N; \\ r, S = N+1; \end{cases}$$

$$\varphi_s = \begin{cases} \varphi - \varphi_0(S-1), S \leq N; \\ \varphi, S = N+1; \end{cases}$$

$$r_s = r.$$

При цьому  $\varphi_0 = 2\pi/N$  для випадку, коли випромінювачі рівномірно з кутом кроком  $\varphi_s = \varphi_0(S-1)$  розміщені вздовж кола радіусом  $r_0$ . У випадку, коли випромінювачі утворюють сектор з кутом розкриття  $\varphi_c, \varphi_0 = \varphi_c/N$ , а кутовий крок їх становить  $\varphi_s = \frac{\varphi_c}{N}(S-1)$ . В наведених виразах коефіцієнти  $A_n^{(s)}$  і  $C_n^{(s)}$  одержані в результаті розв'язку нескінченних систем лінійних алгебраїчних рівнянь (1. ) при використанні в п'єзокерамічних випромінювачах окружної поляризації і (1. ) – радіальної поляризації. Зауважимо, що в дальньому полі нас будуть цікавити амплітудні та фазові діаграми направленості, які визначаються виразами

$$R^{(s)}(\varphi) = \frac{P_D^{(s)}(\varphi)}{\max[P_D^{(s)}(\varphi)]} \text{ та } R(\varphi) = \frac{P_D(\varphi)}{\max[P_D(\varphi)]} \quad (2.5).$$

Для систематизованого дослідження властивостей акустичних полів, що створюються екранованими круговими циліндричними решітками циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів, в залежності від конструктивних характеристик антен визначимо кількісні значення частотних та кутових залежностей амплітуд та фаз акустичного тиску при змінах:

- типу виконання конструкцій випромінювачів силової або компенсованої та фізичних характеристик внутрішніх середовищ випромінювачів;
- складу застосованої в конструкціях випромінювачів п'єзокераміки та характеру її поляризації;
- характеру організації випромінення в антені – кругове або секторне;
- кількості випромінювачів в антені та її розмірів;
- розмірів акустичного екрану та відстані між поверхнями екрану та випромінювачів.

Особливість дослідження акустичних полів полягає в тому, що шукані чисельні їх залежності повинні розраховуватися для тих же значень параметрів та характеристик конструкцій антен, які були використані при дослідженні механічних полів цих антен. Такий підхід забезпечить можливості встановлення кількісних закономірностей зв'язаності та взаємного впливу один на одного всіх фізичних полів, що приймають участь в роботі антен, які розглядаються.

Дослідженню властивостей акустичних полів кругових циліндричних антенних решіток з екраном присвячена значна кількість робіт. Їх сумісний аналіз дозволяє визначити ряд недоліків виконаних досліджень, важливих з точки зору застосування результатів цих досліджень при виконанні проектних робіт. По-перше, ці дослідження носять розрізнений характер і не дозволяють виробити систематизованого погляду та закономірностей відносно впливу особливостей побудови конструкцій антен на їх акустичні властивості. По-друге, при виконанні досліджень в цих роботах застосовуються різні методологічні підходи, що ускладнює співставлення між собою конкретних чисельних результатів по тим чи іншим параметрам полів. По-третє, при виконанні досліджень перевага надається окремим параметрам полів в залежності від окремих характеристик конструкцій

антен. Вплив ряду характеристик конструкцій досліджуваних антен на характеристики їх акустичних полів взагалі не досліджувався. І, нарешті, по-четверте і головне, досліджень по наскрізному підходу до визначення акустичних полів кругових циліндричних антен з екранами, утворених із п'єзокерамічних циліндричних випромінювачів, взагалі не виконувалось.

Аналіз опублікованих робіт [1, 25, 30, 38, 43 ÷ 45, 48, 49, 55 64, 67, 72, 106, 107, 117, 118, 121] свідчить про те, що в основу виконаних досліджень покладено встановлення залежностей направлених властивостей кругових циліндричних антен від їх геометричних розмірів та характеру організації випромінення в антені. Визначені направлені властивості антен в вертикальній та горизонтальній площинах, їх коефіцієнти концентрації, акустичного поля в ближній зона антени.

В ряді робіт [49, 53, 69, 72] визначені акустичні поля кругових циліндричних антен з екраном, утворених із циліндричних випромінювачів. Але ці випромінювачі представлені циліндрами, на поверхні яких заданий розподіл коливальної швидкості без врахування механізмів її утворення. Робіт в яких визначення акустичних полів круговими циліндричними антенними решітками з екраном, утвореними із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів, не встановлено.

Таким чином, наведений огляд опублікованих джерел свідчить про те, що з точки зору методологічного забезпечення проектних робіт по розробці кругових циліндричних антен з екраном дослідження властивостей їх акустичних полів є актуальною необхідністю.

### **3.2 Властивості акустичних полів кругових циліндричних антен з екраном, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів силової конструкції**

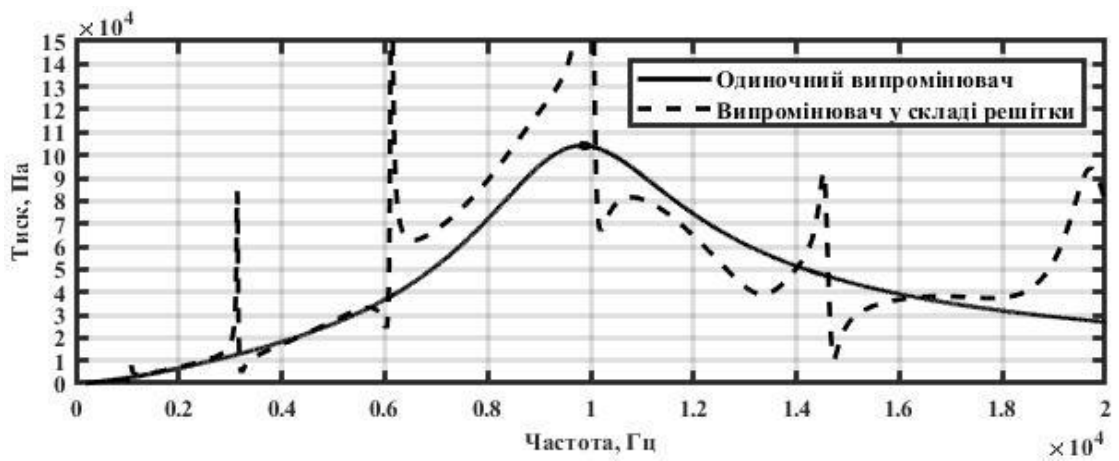
Дослідимо властивості акустичних полів кругових циліндричних антен з екраном у випадку утворення їх із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів силової конструкції можуть бути виконаними [39] у вигляді пристроїв, внутрішні об'єми яких вакуумовані або заповнені повітрям за нормального атмосферного тиску.

Дослідимо частотні залежності амплітуд та фаз тиску акустичних полів в точках на зовнішніх поверхнях випромінювачів з параметрами  $r_s = r_{0s} + \frac{h_s}{2}$ ;  $\varphi_s = \varphi_{0s}$ . Розрахунки виконувалися для наступних значень параметрів антен та їх елементів:  $N = 3$ ;  $U = 200\text{В}$ ;  $r_{0s} = r_0 = 0,068\text{м}$ ;  $h_s = h = 0,008\text{м}$ ; окружна поляризація; склад п'єзокераміки – ЦТБС-3;  $M_s = M = 48$ ;  $r_{0N+1} = 0,072\text{м}$ ;  $R = 0,149\text{м}$ ; кругове випромінення; секторне випромінення в секторі  $\varphi_s = 60^\circ$ . Результати розрахунків частотних залежностей для антен утворених із вакуумованих випромінювачів представлені на рис. 3.1 ÷ 3.2, а для заповнених повітрям – на рис. 3.3 ÷ 3.4.

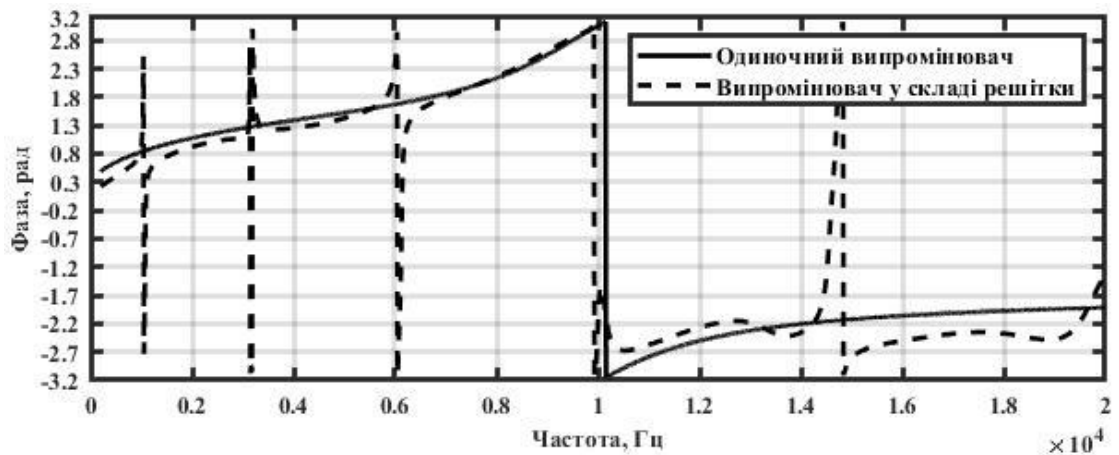
Перш ніж здійснювати аналіз розрахунків, зауважимо наступне. Із фізичних уявлень зрозуміло, що при формуванні акустичних полів досліджуваних антенних решіток мають місце декілька видів взаємодії елементів решіток по їх акустичним полям. Фізичною причиною цих взаємодій є багатократний обмін звуковими хвилями – випроміненими і відбитими між елементами решіток. До цих взаємодій відносяться наступні. В зовнішньому середовищі мають місце має місце взаємодія між екраном і випромінювачами, взаємодія між самими випромінювачами, що утворюють антенну решітку, і взаємодія випромінювачів і екрана з оточуючим їх зовнішнім середовищем при випроміненні і відбитті звукових хвиль. Вплив цих видів акустичних взаємодій в кількісному відношенні можливо встановити шляхом порівняння акустичних полів:

- одиночних випромінювачів з екраном і без нього для виявлення впливу екрану;
- випромінювачів одиночного з екраном або у складі кругової решітки з екраном при далекому їх рознесенні між собою з випромінювачами у складі антени з секторним випроміненням.

У внутрішніх середовищах випромінювачів має місце взаємодія створюваних ними акустичних полів з акустичними особливостями скінченних об'ємів цих середовищ.



а)



б)

Рис. 3.1 Частотні залежності амплітуд (а) та фаз (б) акустичного тиску вакуумованих випромінювачів при круговому випромінненні антен з екраном

Як вже відзначалося, в математичному відношенні взаємодія складових елементів по акустичному полю кругових антен з екранами визначається подвійними сумами, що входять до виразів (1.21) і (1.22). В них функції Ханкеля  $H_{m-n}^{(1)}(kr_{q,S})$  і  $H_{m-n}^{(1)}(kr_{q,N+1})$  демонструють відповідно, взаємодію випромінювачів між собою і випромінювачів з екраном, яка виникає між ними при обміні між собою випроміненими та відбитими звуковими хвилями  $n$ -го та  $m$ -го порядків. В кількісному відношенні акустична взаємодія елементів в антені визначається відстанями між випромінювачами і між випромінювачами та екраном. Вона максимально при мінімальних значеннях відстаней  $r_{q,S}$  і  $r_{q,N+1}$  і зникає при  $r_{q,S} \rightarrow \infty$  і  $r_{q,N+1} \rightarrow \infty$ . В останньому випадку характеристики випромінювачів у складі антени і поза нею стають однаковими.



Проведемо аналіз частотних залежностей акустичного тиску з врахуванням наведених зауважень.

Аналіз кривих рис.3.1 і 3.2 дозволяє визначити кількісний вплив на формування акустичних полів антени з екраном відповідно взаємодії між випромінювачем і екраном і взаємодії випромінювачів між собою і між ними і екраном.

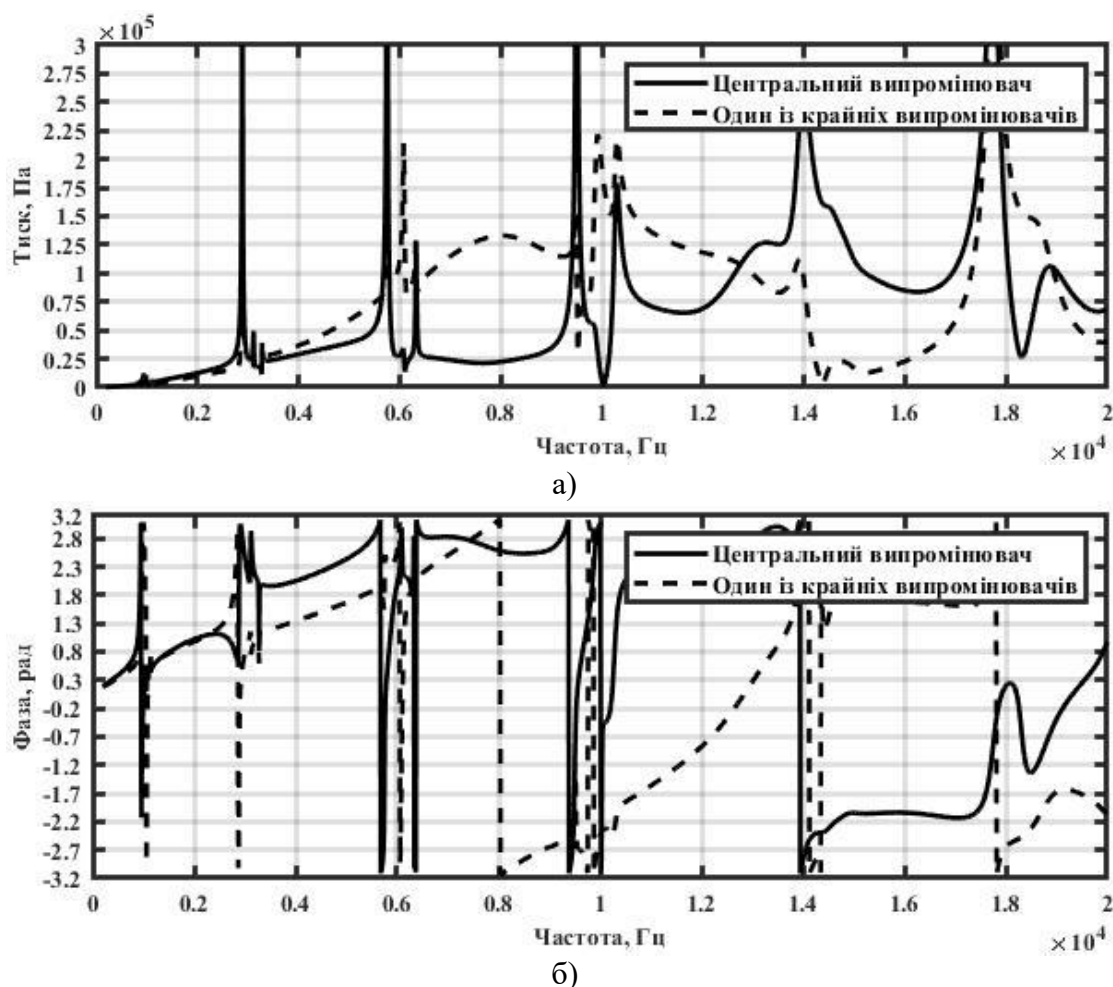


Рис. 3.2 Частотні залежності амплітуд (а) та фаз (б) акустичного тиску вакуумованих випромінювачів при секторному випромінненні антени з екраном

Згідно із прийнятою в попередньому розділі схемою аналізу частотних залежностей полів розіб'ємо весь досліджуваний діапазон частот на три області. Перш за все зауважимо, що при круговому випромінненні кругової антени з екраном всі її випромінювачі з точки зору взаємодії по акустичному полю знаходяться в однакових, що і відображують криві рис. 3.1. Крім того, при малій кількості випромінювачів в такій антені основний вплив на формування її акустичного поля здійснює обмін акустичними хвилями між випромінювачами і екраном. В

низькочастотній області ( $0 \div 7000$  Гц) ця акустична взаємодія обумовлює появу ряду нових додаткових резонансних частот (рис. 3.1 б), значення яких в  $(10 \div 15)$  раз менші значень основної резонансної частоти п'єзокерамічної оболонки випромінювачів. При цьому амплітуди акустичних тисків на цих додаткових резонансних частотах порівняні або значно більші за амплітуди тиску одиночного випромінювача без екрану (рис.3.1 а). В резонансній області ( $7000 \div 14000$  Гц) акустична взаємодія між випромінювачами та екраном перетворює плавний хід частотної залежності амплітуди одиночного випромінювача без екрана в криву з кількома провалами, один з яких припадає саме на частоту резонансу одиночного випромінювача. При цьому амплітуда тиску на частоті центрального резонансу випромінювачів у складі досліджуваної антен в декілька разів перевищує резонансну амплітуду тиску одиночного випромінювача. В високочастотній області ( $14000 \div 20000$  Гц) акустична взаємодія випромінювачів з екраном у складі антени знову перетворює плавно спадаючу криву одиночного випромінювача без екрана в багаторезонансну частотну залежність з амплітудами як значно більшими, так і значно меншими порівняно із цим випромінювачем.

Перехід в круговій антені з екраном від кругового випромінення звуку до секторного ( рис. 3.2) обумовлює появу в антені ще і взаємодії по акустичному полю між випромінювачами, результатом чого є суттєва зміна частотних залежностей акустичного тиску на поверхнях випромінювачів.

По-перше, частотні залежності тиску стають суттєво залежними від місця розташування випромінювачів в круговій антені. По-друге, загальний рівень випромінення суттєво відрізняється в різних частотних діапазонах для крайніх і середніх випромінювачів кругової антени з екраном при секторному випроміненні звуку. В областях низьких і резонансних частот загальний рівень випромінення звуку у крайніх випромінювачів більший ніж у середніх. В високочастотній же області (рис. 3.2) крайні випромінювачі мають значення частот і амплітуд утворених в антені додаткових резонансів близькі до значень, характерних при круговому випроміненні (рис. 3.1). В той самий час в цій області у середніх випромінювачів кількість додаткових резонансів збільшується, значення їх резонансних частот

порівняно з крайніми випромінювачами зменшується, а амплітуди акустичного тиску на цих частотах суттєво збільшуються. В області резонансних частот поява додаткової сильної акустичної взаємодії між випромінювачами в круговій антені з екраном практично розвалює широкосмугову резонансну криву п'єзокерамічної оболонки без екрану (рис. 3.1 а) на ряд резонансів із значно меншими резонансними смугами в  $(10 \div 15)$  разів, але суттєво більшими амплітудами акустичних тисків в них (рис. 3.2 а). Такий хід частотних залежностей в цій області має місце як для середніх, так і для крайніх випромінювачів. В високочастотній області значення нових додаткових резонансних частот у крайніх та середніх випромінювачів кругової антени з екраном при секторному випромінненні (рис. 3.2) майже співпадають, але суттєво відрізняються для таких резонансів при круговому випромінненні (рис. 3.1). При цьому резонансні амплітуди при секторному випромінненні є значно більшими ніж при круговому.

До цього часу розглядалися антени з екраном, утворені із вакуумованих випромінювачів. Вони характеризуються відсутністю пружного середовища у внутрішній їх порожнині, завдяки чому в них не можуть поширюватися звукові хвилі. До силових конструкцій випромінювачів відносяться також випромінювачі, внутрішній об'єм яких заповнений повітрям при нормальному атмосферному тиску. Природно, що при випромінненні звуку в цей об'єм внутрішніми поверхнями п'єзокерамічної оболонки в ньому поширюються звукові хвилі. Реакція середовища в об'ємі скінчених розмірів на збудження в ньому звукових хвиль має вигляд внутрішніх резонансів, амплітуди і частоти яких відображуються на частотній залежності акустичного тиску (рис. 3.3) на поверхнях випромінювачів. Заповнення повітрям внутрішніх порожнин випромінювачів антени, що досліджується (рис. 3.3) при обох видах випроміннення порівняно з вакуумованими випромінювачами (рис. 3.1, 3.2) зберігає форму і кількісні значення частотних залежностей акустичного тиску та генерацію додаткових резонансів у всьому частотному діапазоні. Внесок взаємодії п'єзокерамічних оболонок випромінювачів з їх внутрішніми середовищами в частотні залежності тиску полягає в подальшому збагаченні спектру резонансних частот акустичного поля новими

значеннями. На відміну від додаткових резонансів резонанси, обумовлені повітряним середовищем внутрішніх об'ємів випромінювачів, є дуже вузькосмуговими (3 – 4 Гц). Останнє явище обумовлене малими втратами звукової енергії у внутрішньому повітряному просторі оболонок випромінювачів при поширенні в них звукових хвиль. Крім того, слід відзначити наявність суттєвого зв'язку між акустичними полями ззовні і всередині кожного із випромінювачів антени. Це витікає із порівняння між собою кривих рис. 3.3. Їх аналіз показує, що, по-перше, у випромінювачів у складі кругової антени кількість вузькосмугових резонансів більша, ніж у одиночного випромінювача без екрана, і, по-друге, ці резонансні частоти відрізняються по значенню для крайніх і середніх випромінювачів кругової антени з екраном і секторним випроміненням.

Значний інтерес становить визначення фізичного механізму впливу взаємодії елементів кругової антени з екраном по акустичному полю на формування нею акустичного поля. Перш за все відмітимо, що при обраному способі електричного збудження п'єзокерамічних випромінювачів з окружною поляризацією їх електричні поля є радіально симетричними незалежно від того, працюють вони у складі антени або як одиночні. Але останнє суттєвим чином впливає на характер їх акустичного навантаження, обумовлений випроміненням звуку. Для одиночного кругового циліндричного випромінювача умови його радіаційного навантаження оточуючим середовищем є радіально симетричними. Наявність радіально симетрії і електричного і акустичного навантажень обумовлює можливість «закачування» енергії в механічне поле п'єзокерамічного випромінювача лише на нульовій моді коливань його циліндричної оболонки. При роботі ж випромінювачів у складі кругової антени радіальна симетричність їх електричного навантаження не змінюється і тому енергія «закачується» в їх механічні поля, як і раніше, тільки на нульовій моді. В той же час поява акустичної взаємодії між елементами кругової антени з екраном порушує радіальну симетрію акустичного навантаження її випромінювачів. В кількісному відношенні величина цього порушення залежить від багатьох фізичних факторів, в тому числі і конструктивних. Про це свідчать криві кутового розподілу акустичного тиску на поверхнях випромінювачів (рис. 3.4 і 3.5).

Їх аналіз показує, що наявність акустичної взаємодії є фізичною причиною зміни однорідного кутового розподілу акустичного тиску на поверхні одиночного випромінювача на вкрай неоднорідний при розміщенні випромінювача у складі кругової антени з екраном. Ця неоднорідність має місце для будь-якої частоти у всьому досліджуваному частотному діапазоні. При цьому звертає на себе увагу ряд особливостей. По-перше, найбільша ступінь неоднорідності кутового розподілу тиску має місце на частотах, яким відповідають резонанси оболонок. По-друге, в області кутів, які прилягають до акустичного екрану антени, акустичний тиск на поверхнях випромінювачів є одним з найнижчих.

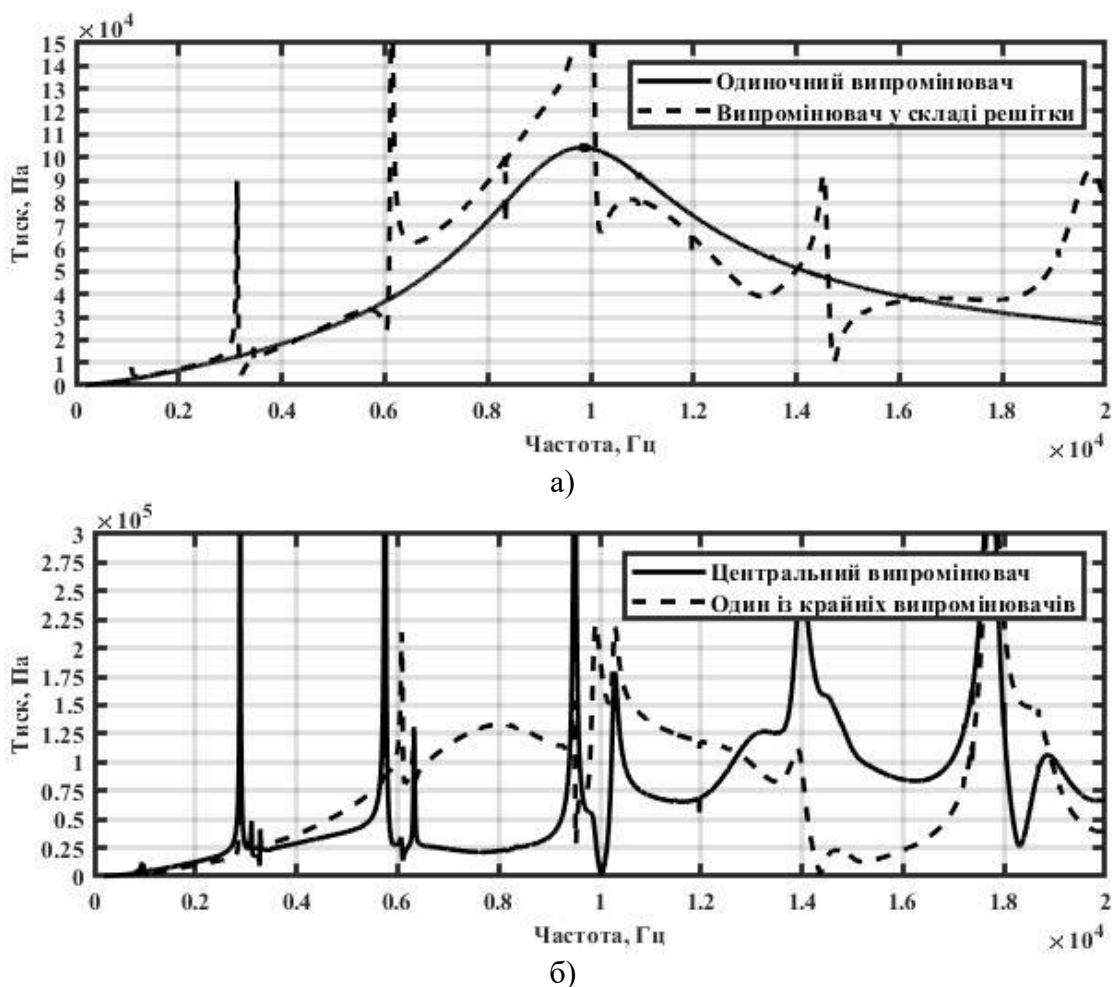
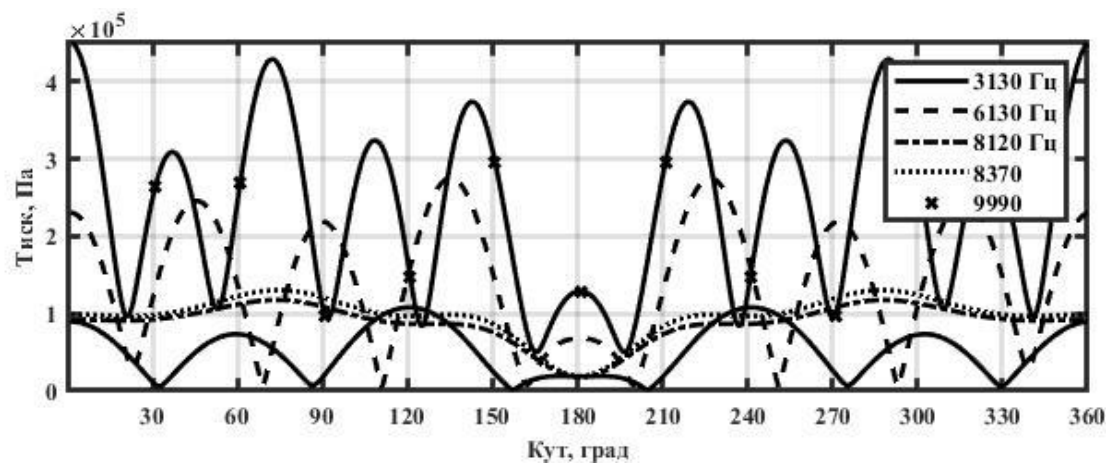
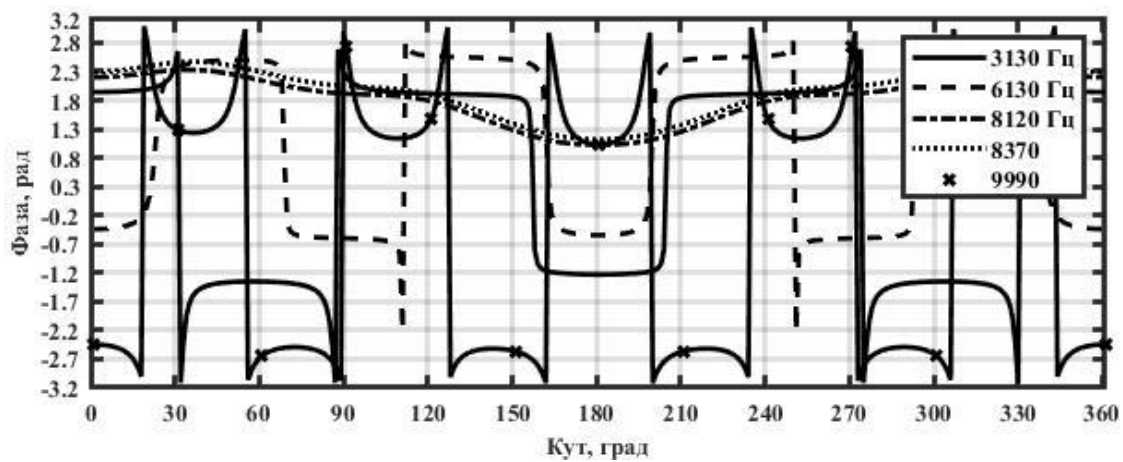


Рис. 3.3 Частотні залежності амплітуд акустичного тиску заповнених повітрям випромінювачів при круговому (а) та секторному (б) випромінненні з екраном

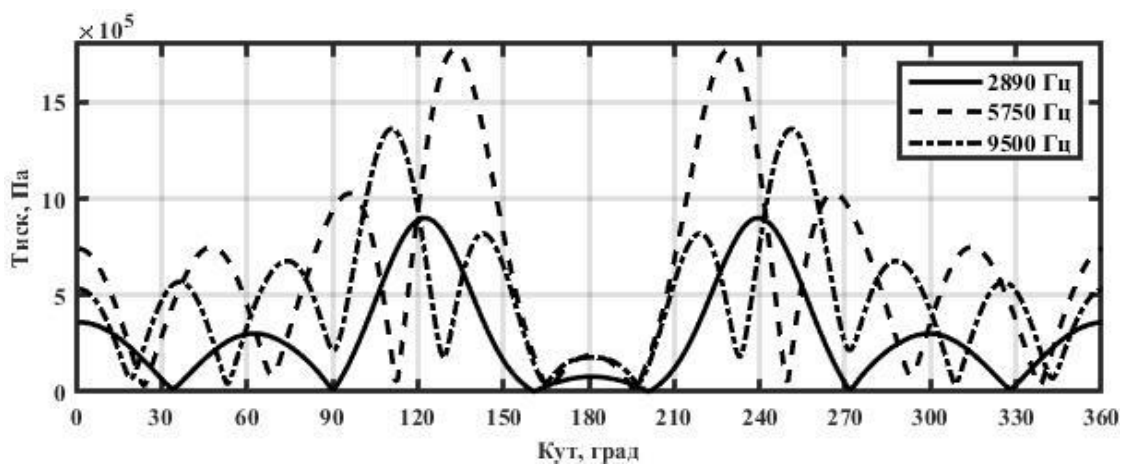


а)

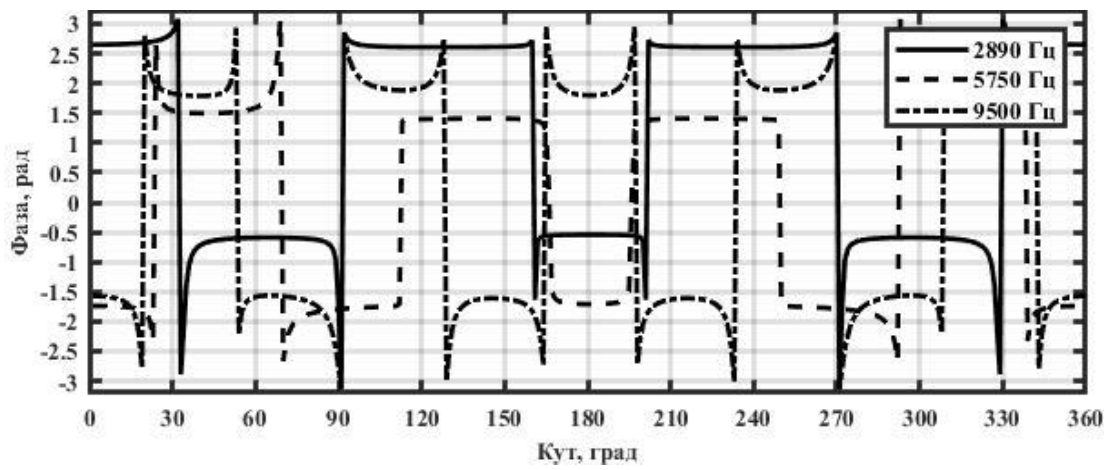


б)

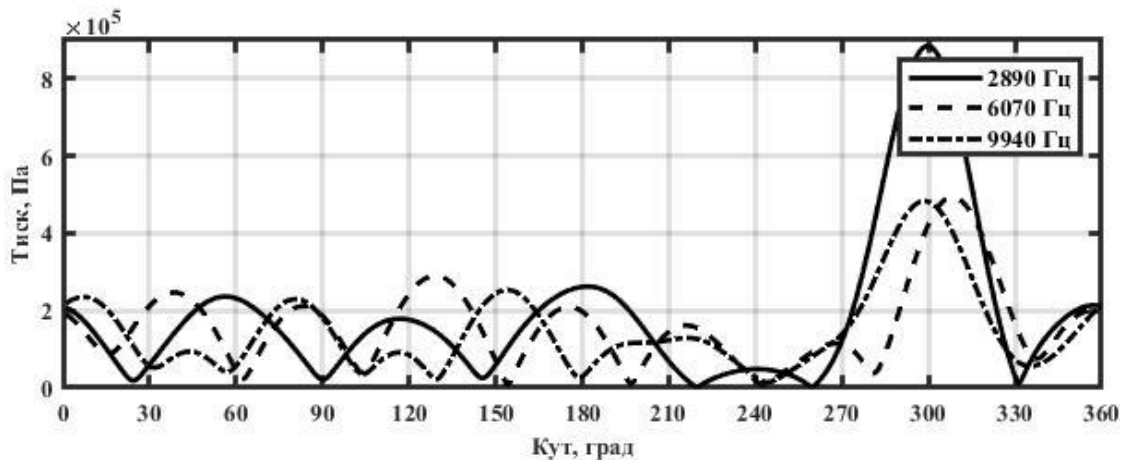
Рис. 3.4 Кутівий розподіл амплітуд (а) та фаз (б) акустичного тиску на поверхні заповненого повітрям випромінювача при круговому випромінненні кругової антени з екраном на різних частотах



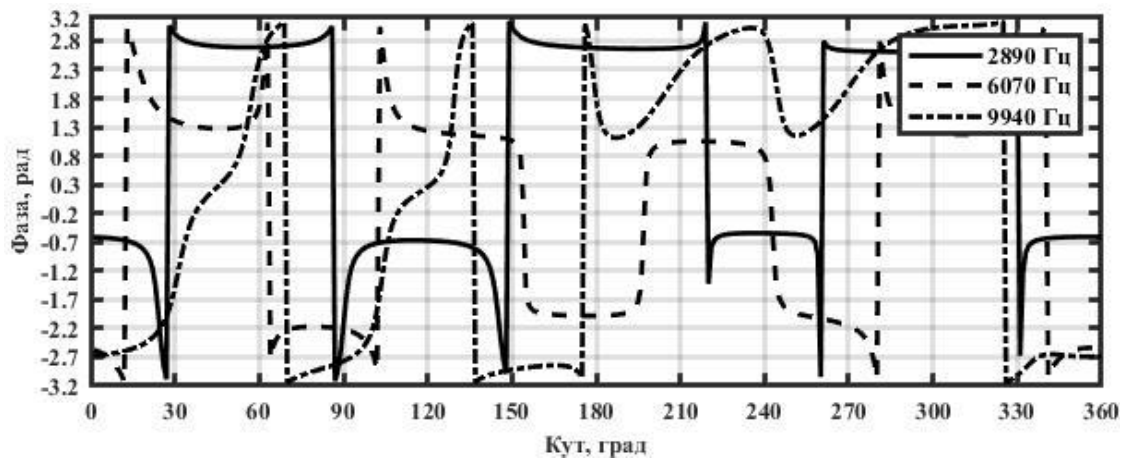
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.5 Кутовий розподіл амплітуд (а, в) та фаз (б, г) акустичного тиску на поверхнях середнього (а, б) та крайнього (в, г) заповнених повітрям випромінювачів при секторному випромінненні кругової антени з екраном на різних частотах

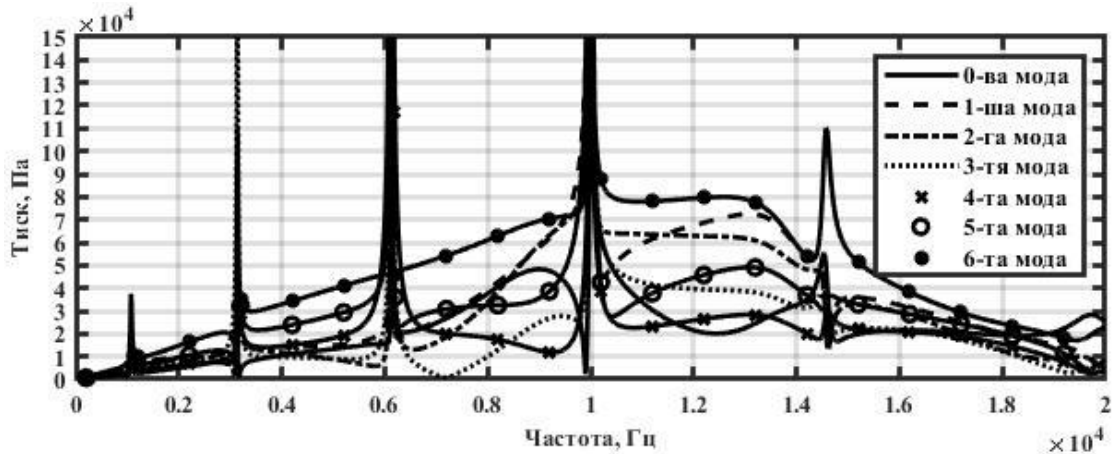
Встановлене і кількісно визначене порушення завдяки акустичній взаємодії елементів кругової антени з екраном радіальної симетрії акустичного навантаження

випромінювачів при збереженні її при електричному навантаженні обумовило появу наступних за нульовою мод коливань п'єзокерамічних оболонок в механічних полях випромінювачів кругової антени з екраном і ефективний перерозподіл енергії, яка «закачується» в випромінювачі на нульовій моді їх коливань, між цими модами.

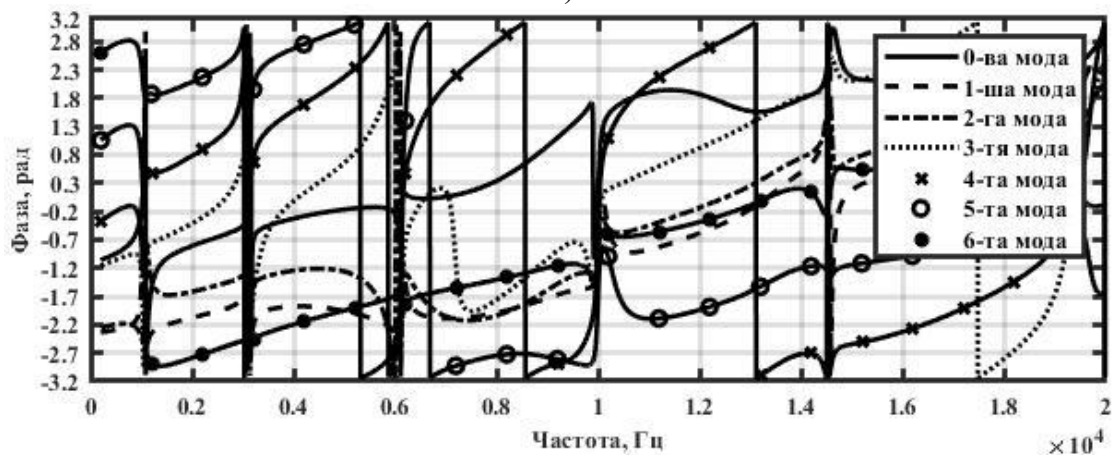
Природно, що перехід одномодової структури механічного поля одиночного циліндричного п'єзокерамічного випромінювача в багатомодову структуру при розміщенні таких випромінювачів у складі кругової антени з екраном обумовлює появу мод складових тиску, які відповідають кожній з цих мод, в акустичному полі антени. Аналіз частотних залежностей складових акустичного тиску (рис. 3.6 і 3.7) і порівняння їх з частотною залежністю акустичного тиску в цілому (рис. 3.1 і 3.2) на поверхнях випромінювачів дозволяє встановити наступне. Енергія, яка «закачується» у випромінювачі на нульовій моді їх коливань, поділяється між складовими акустичного тиску, які відповідають значній кількості цих мод. Цей розподіл є доволі нерівномірним як для різних частотних діапазонів, так і для різних складових тиску по модам. Останнє обумовлено як різною як різною ефективністю мод коливань по відбору енергії від нульової моди, так і характером кутового розподілу модових складових акустичного тиску по поверхнях випромінювачів. Із наведених результатів витікає, що найбільший енергетичний потенціал модових складових акустичного тиску припадає на резонансну та високочастотну області. В цих областях амплітуди акустичного тиску можуть відрізнятися між собою в  $(4 \div 10)$  разів, при чому найбільша енергетика припадає на складові, що утворюються більш високими модами коливань. Резонансна область складової акустичного тиску, що відповідає нульовій моді, суттєво звужується, але амплітуда її акустичного тиску на власній резонансній частоті п'єзокерамічних оболонок випромінювачів та прилеглих до неї вузькосмугових резонансах залишається найбільшою. Додаткові резонансні викиди акустичного тиску випромінювачів (рис. 3.1 і 3.2) в низькочастотній та високочастотній областях утворюються складовими акустичного тиску, які відповідають певним модам коливань (рис. 3.6 і 3.7), хоча в їх формуванні приймають участь і інші модові складові тиску зі своїми значеннями амплітуд та фаз на частотах цих додаткових резонансів. Слід відзначити також, що вузькосмугові



викиди акустичного тиску, обумовлені резонансними явищами, що виникають у замкнутих внутрішніх об'ємах п'єзокерамічних оболонок випромінювачів, проявляються однаково на одних і тих же частотах на частотних залежностях всіх модових складових акустичного тиску випромінювачів.

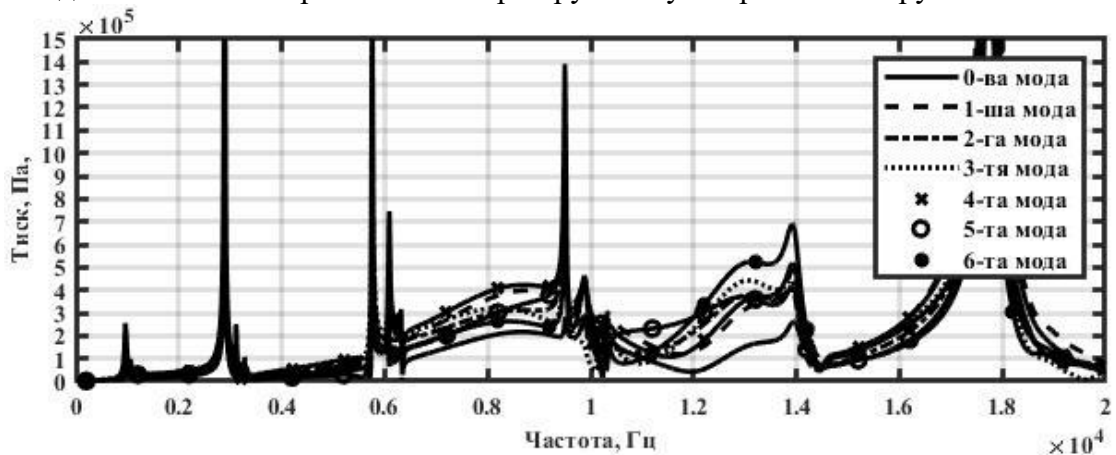


а)

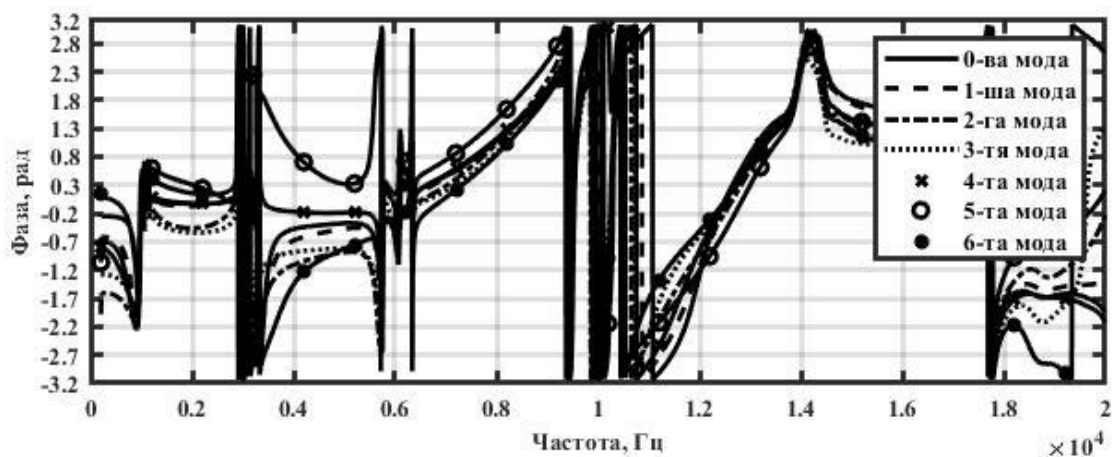


б)

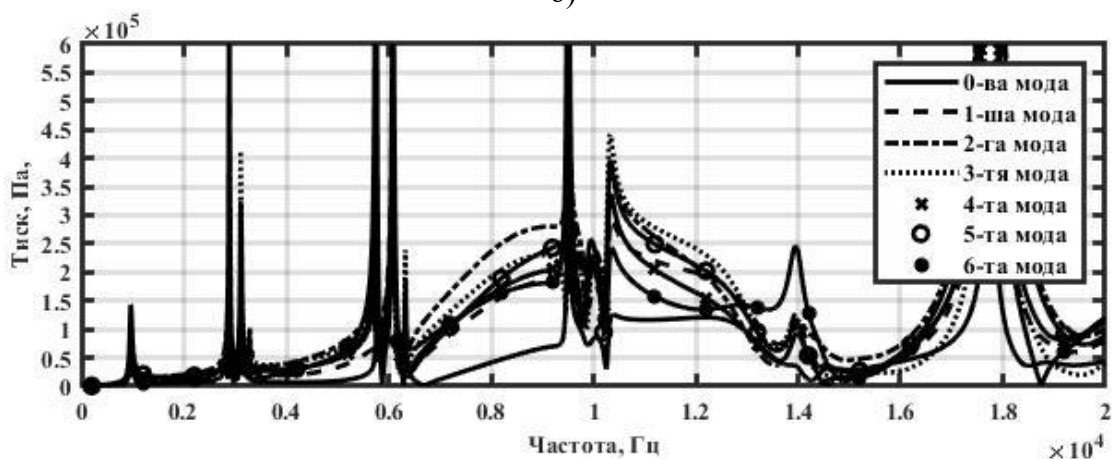
Рис. 3.6 Частотні залежності амплітуд (а) та фаз (б) складових акустичного тиску, які відповідають модам коливань випромінювачів при круговому випромінненні кругової антени



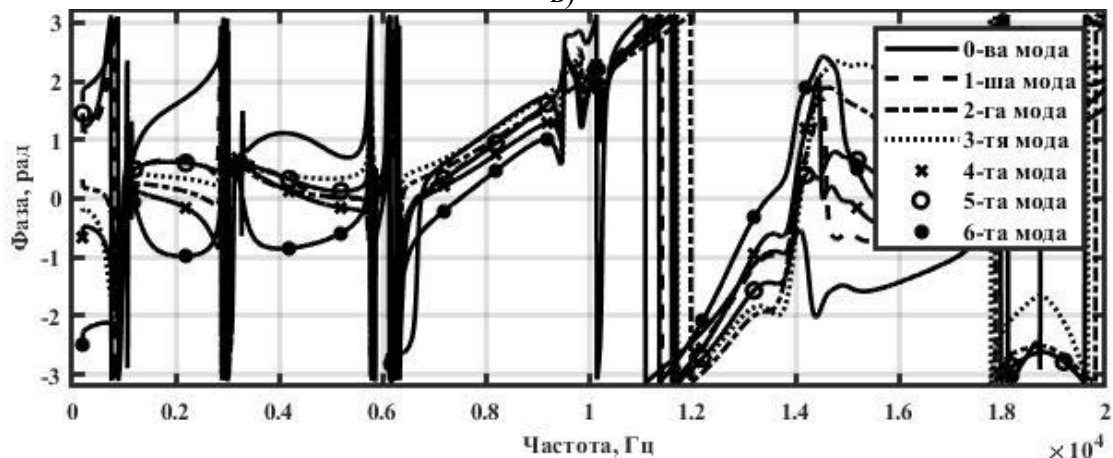
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.7 Частотні залежності амплітуд (а, в) та фаз (б, г) складових акустичного тиску, які відповідають модам коливань середнього (а, б) та крайнього (в, г) випромінювачів при секторному випромінненні антени з екраном

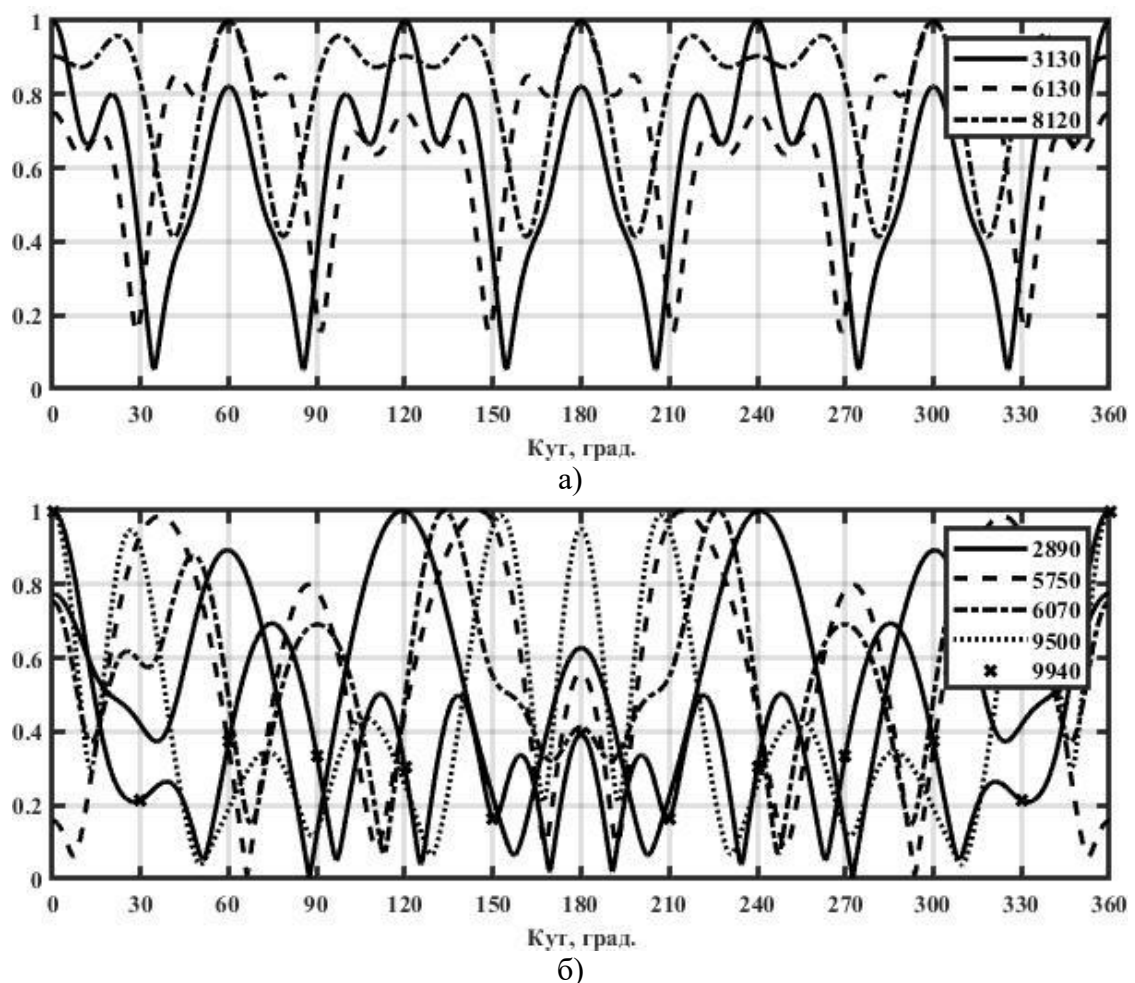


Рис. 3.8 Кутові залежності акустичного тиску кругової антени з екраном в дальньому полі при круговому (а) та секторному (б) випромінненні заповнених повітрям випромінювачів  
Викладений аналіз фізичного механізму впливу взаємодії елементів кругової

антени з екраном по акустичному полю, обумовленої багатократним розсіянням звукових хвиль, на формування її фізичних полів стосувався ближньої зони антени.

Розглянемо тепер, як діє цей механізм при формуванні акустичних полів антени в її дальньому полі. Аналіз графіків рис. 3.8 дозволяє встановити наступне. Як і очікувалося, при круговому випромінненні сигналів круговою циліндричною антеною з екраном (рис. 3.8 а) антена формує акустичне поле з максимальними значеннями в областях кутів, які прилягають до напрямків розміщення випромінювачів в антенах і в середніх між ними. Розрахунки показують, що наведена на графіках форма кутового розподілу амплітуд акустичного тиску, в якій максимальні значення чергуються із мінімальними, зберігається в широкому діапазоні частот, який включає і частоти додаткових акустичних резонансів. Провали між максимальними значеннями поля зменшуються при зменшенні значень робочих частот антени і збільшенні кількості випромінювачів в ній.

Перехід від кругового випромінення звуку до секторного принципово змінює ситуацію пов'язану із направленістю кругової антени з екраном. Ці зміни полягають в набутті антеною властивості однонаправленості. Ця однонаправленість формується в області кутів, які прилягають до напрямку розміщення центрального випромінювача сектора. При цьому зі сторони екрану в цьому секторному кутовому розподілі формуються амплітуди тиску з низькими рівнями. Це характерно для більшості частот. Однак при цьому є і виключення. Вони пов'язані із деякими частотами додаткових резонансів. Наприклад, на частоті 5750 Гц (рис. 3.3 б і 3.8 б) кутовий розподіл амплітуд тиску в напрямку центрального випромінювача сектора має мінімальне значення. Останнє можливо пояснити тим, що амплітуди тиску, які відповідають шостій моді коливань (рис. 3.7) і у центрального, і у крайніх випромінювачів антени, є значно більшими порівняно із амплітудами тиску, які відповідають іншим модам механічних полів, а фаза – протилежна фазам цих мод.

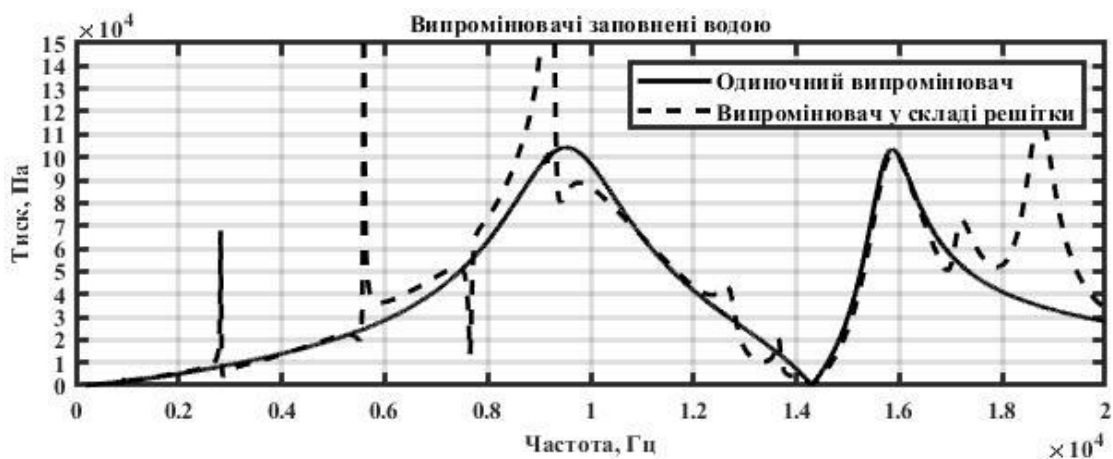
### **3.3 Властивості акустичних полів кругових циліндричних антен з екраном, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів компенсованої конструкції**

Як вже відмічалось, в практичній гідроакустиці широке застосування знайшли циліндричні п'єзокерамічні випромінювачі як силової, так і компенсованої конструкцій. Останні забезпечили можливість створення на їх основі глибоководних гідроакустичних антен. Особливістю побудови конструкції таких випромінювачів є вибір фізичних параметрів пружних рідинних середовищ, якими заповнюються внутрішні об'єми цих конструкцій. Цими рідинними середовищами можуть бути вода або електроізоляційні рідини різних видів, зокрема, мастило. Як показали результати досліджень, виконані і по механічним, і по акустичним полям випромінювачів при заповненні їх внутрішніх об'ємів пружним середовищем, вплив фізичних параметрів цих середовищ на фізичні поля випромінювачів у складі кругових антен з екраном є значним.

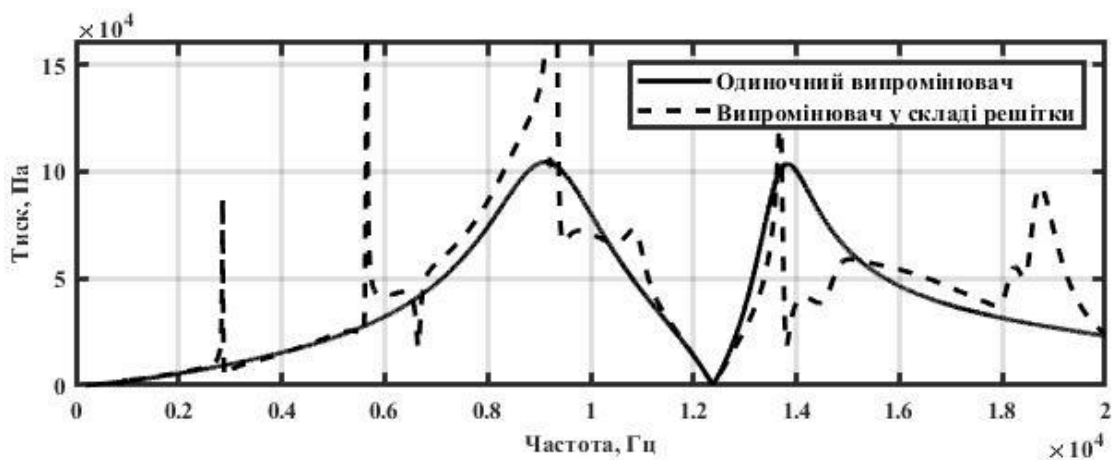
Дослідимо цей вплив на акустичні поля стосовно випромінювачів компенсованої конструкції шляхом чисельних експериментів. Для забезпечення можливостей співставлення між собою одержаних результатів при різних конструктивних

характеристиках одних і тих самих антен досліджувані акустичні характеристики і розрахункові значення параметрів антен та їх елементів приймалися такими ж, як у попередньому підрозділі. В якості виключень були прийняті фізичні характеристики середовищ у внутрішніх об'ємах компенсованих конструкцій випромінювачів. При розрахунках були використані наступні значення відношень хвильових опорів внутрішніх і зовнішніх середовищ:  $\frac{\rho_1 c_1}{\rho c} = 1, 0; 0,75$  і  $0,5$ .

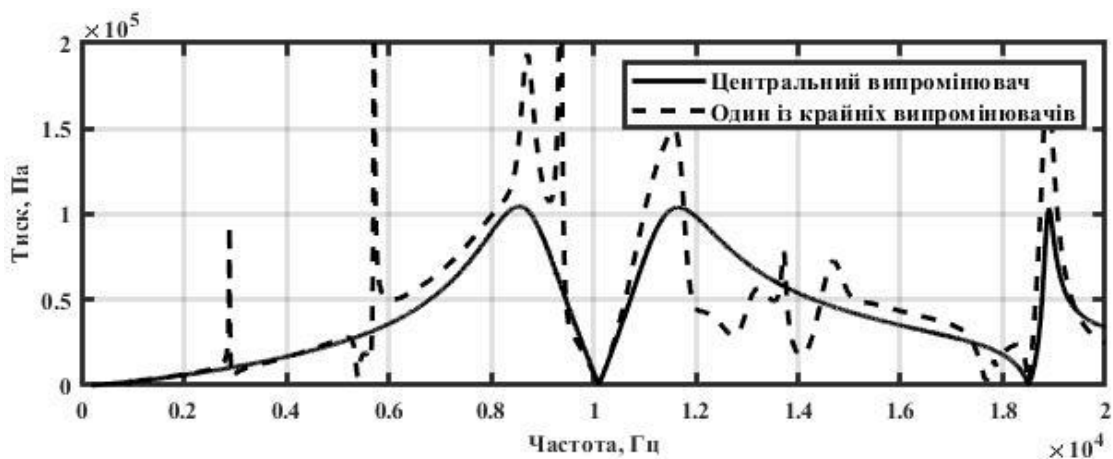
Із фізичних уявлень зрозуміло, що в кругових антенах з екраном, утворених із компенсованих випромінювачів, мають місце всі ті види взаємодії елементів антен по акустичному полю, які були встановлені для антен із силових випромінювачів. Більше того, як свідчать криві рис. 3.9 а, г заповнення водою внутрішнього об'єму конструкції



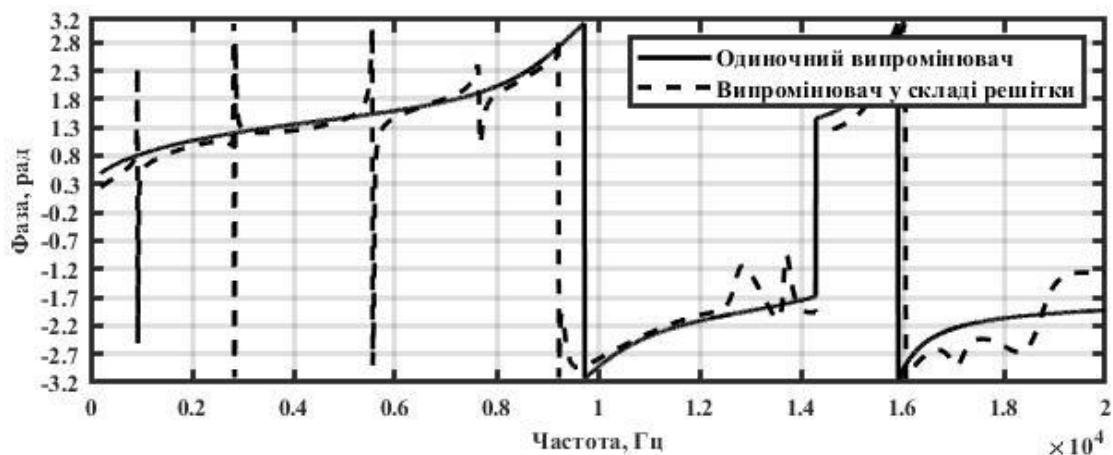
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.9 Частотні залежності амплітуд (а, б, в) та фаз (г) акустичного тиску випромінювачів при круговому випромінненні антен з екраном і заповненням внутрішнього об'єму рідинами із

$$\frac{\rho_1 c_1}{\rho c} = 1,0 (\text{а, г}); 0,7 (\text{б}); 0,5 (\text{в})$$

одиначного випромінювача суттєво підвищує акустичну взаємодію його випромінюючої п'єзокерамічної оболонки з внутрішнім середовищем. Свідченням цього є поява в області високих частот другого резонансу, пов'язаного з внутрішнім об'ємом. До речі його резонансна частота близько до одної з резонансних частот (рис. 3.3 а) заповненого повітрям випромінювача силової конструкції.

Розміщення біля випромінювачів акустичного екрану в круговій антені обумовлює появу ще одного виду акустичної взаємодії, а саме – взаємодії між випромінювачем і екраном. Про кількісний вплив двох названих видів акустичної взаємодії на формування акустичних полів досліджуваної антени свідчать криві рис. 3.9 а, г. Їх аналіз показує, що обмін розсіяними хвилями між випромінювачами і

екраном є причиною появи ряду нових ефектів. В низькочастотній області з'являється ряд додаткових резонансних викидів, частоти яких співпадають з частотами відповідних резонансів в механічному полі такої ж антени і близькі або нижчі від таких же резонансів в акустичному полі цієї антени, утвореної із силових випромінювачів (рис. 3.1). Цей обмін хвилями в резонансній області головним чином спотворює і частотну залежність акустичного тиску на поверхнях випромінювачів – резонансна смуга в області основного резонансу оболонок випромінювачів суттєво зменшується, а сама залежність приймає хвилеподібний характер. Частотні залежності і амплітуди, і фази в високочастотній області суттєво змінюють і свої форми, і кількісні значення порівняно як з одиночним водозаповненим випромінювачем (рис. 3.9 а, г), так і з силовими випромінювачами такої ж кругової антени з екраном (рис.3.1). Зауважимо, що при цьому не всі додаткові викиди акустичного тиску є резонансними.

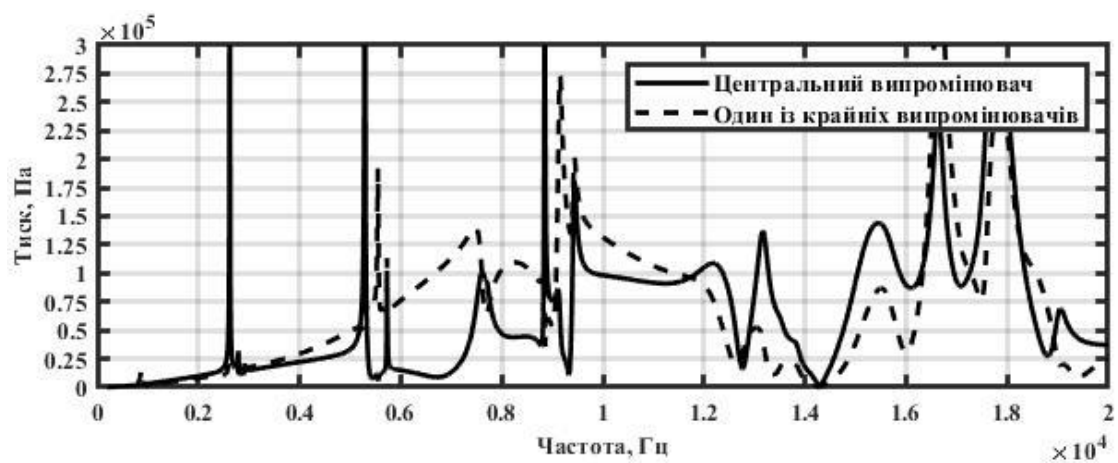
Зміна фізичних характеристик заповнюючого випромінювачі середовища суттєвим чином, але по-різному в різних частотних областях впливає на формування акустичних полів досліджуваної антени. Для одиночного випромінювача вона супроводжується (рис. 3.9), по-перше, зниженням значень резонансних частот випромінювачів і, по-друге, суттєвим зменшенням смуг цих резонансів. Крім того, в високочастотній області з'являється ще один резонанс. В той же час при розміщенні акустичного екрану поблизу таких випромінювачів, як це має місце в круговій антені з екраном, заміна пружних середовищ на нові з меншим значенням  $\frac{\rho_1 c_1}{\rho c}$  практично не змінює ситуацію з додатковими резонансами в низькочастотній області (рис. 3.9 а, б, в). В резонансній області зменшення величини  $\frac{\rho_1 c_1}{\rho c}$  супроводжується збільшенням кількості викидів акустичного тиску, частина з яких є резонансними. Така ж ситуація має місце і в високочастотній області.

Перехід від кругового випромінювання з малою кількістю випромінювачів в круговій антені з екраном до секторного в такій же антені з малою відстанню між випромінювачами обумовлює появу ще одного виду акустичної взаємодії до раніше

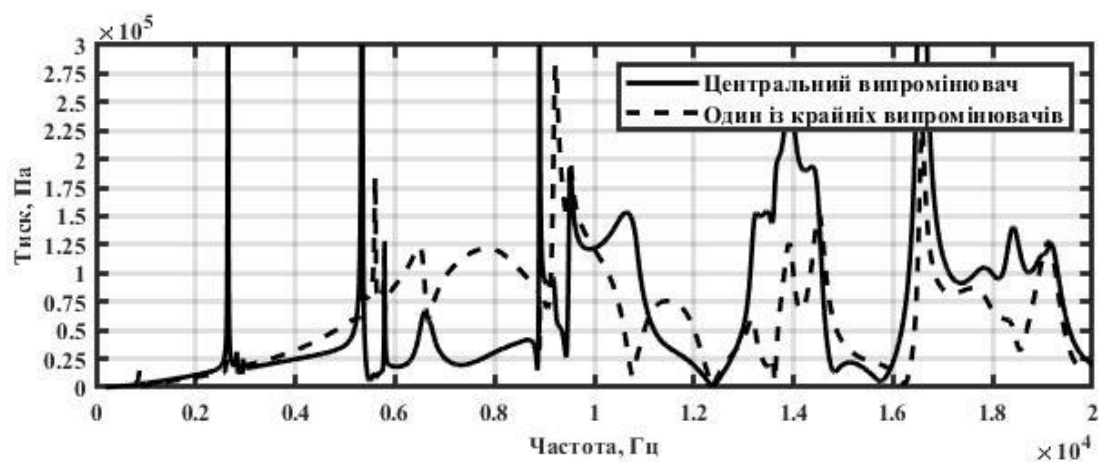
названих – взаємодії між випромінювачами. Як і у випадку антен із випромінювачів силової конструкції, перехід до компенсованих випромінювачів супроводжується появою значних змін в частотній залежності амплітуд і фаз акустичного тиску досліджуваних антен (рис. 3.10). При цьому виникає ряд нових факторів. По-перше, як і у випадку силових конструкцій випромінювачів, досліджувані частотні характеристики випромінювачів у складі антени стають такими, що залежать від місця їх розташування в антені. І, по-друге, суттєвий вплив здійснюють фізичні характеристики рідини у внутрішньому об'ємі випромінювачів. Як і у випадку побудови кругових антен з екраном із випромінювачів силової конструкції (рис.3.2), заміна їх на компенсовані випромінювачі залишає в силі встановлену раніше закономірність, згідно з якою в низькочастотній і резонансній областях (рис. 3.10) частоти додаткових резонансних викидів у крайніх випромінювачів секторних антен є вищими, ніж у середніх. Зменшення відношення  $\frac{\rho_1 c_1}{\rho c}$  не порушує закономірність, але обумовлює зміну поведінки амплітуд додаткових акустичних резонансів і викидів – у крайніх випромінювачів вона збільшується. В резонансній і високочастотній областях зменшення хвильового опору  $\rho_1 c_1$  внутрішніх середовищ порівняно з зовнішнім  $\rho c$  супроводжується зменшеннями амплітуд акустичного тиску на зовнішніх поверхнях випромінювачів у всьому досліджуваному частотному діапазоні; збільшення кількості викидів акустичного тиску, не всі з яких є резонансними; зменшенням в цілому амплітуд акустичного тиску у крайніх випромінювачів порівняно з середніми.

В попередньому підрозділі був встановлений фізичний механізм впливу акустичної взаємодії елементів кругової антени з екраном на формування її акустичних полів. Дослідження показують, що цей механізм зберігається і при випромінненні гідроакустичних сигналів екранованими круговими антенами, утвореними із циліндричних випромінювачів компенсованої конструкції.

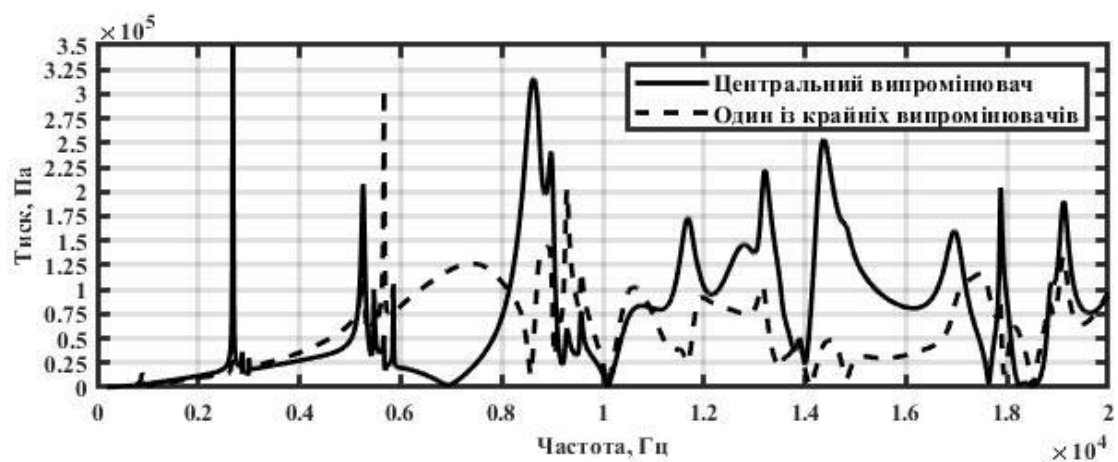




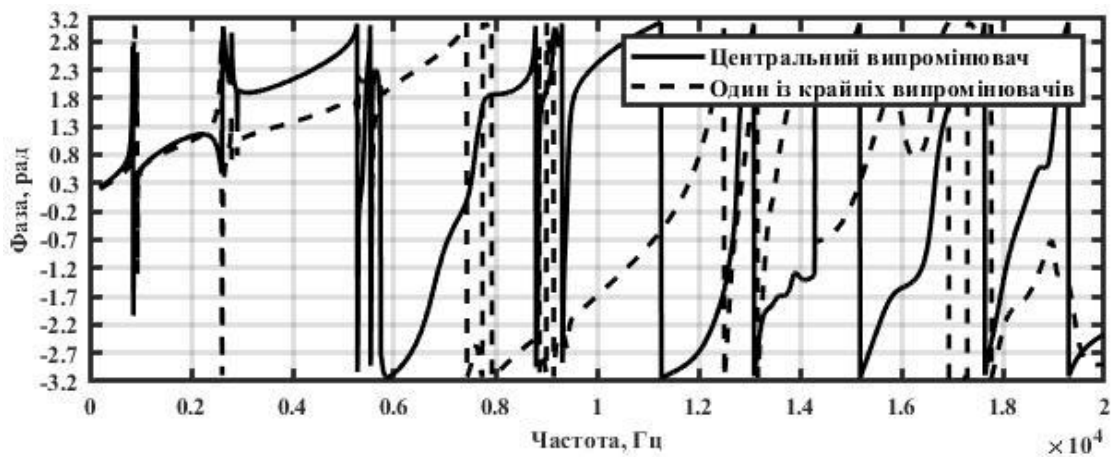
а)



б)



в)

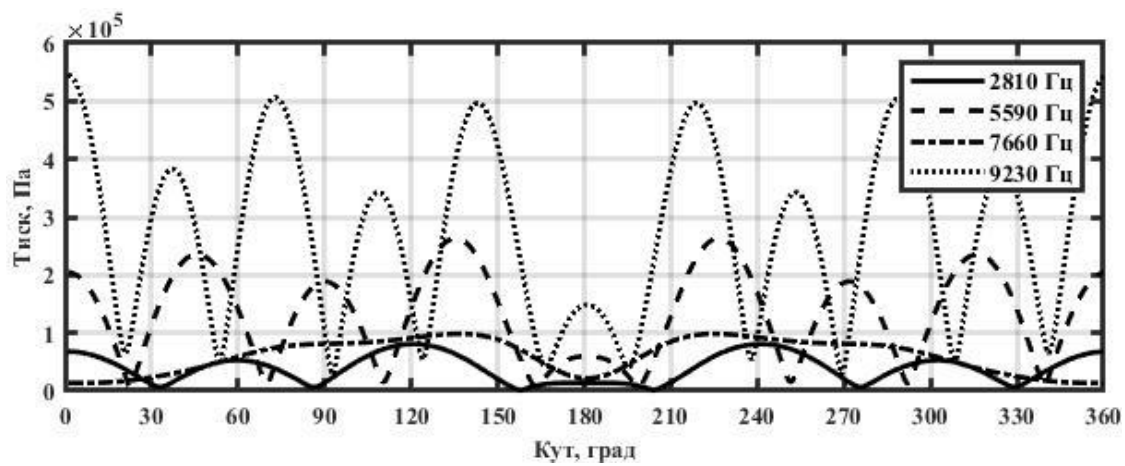


г)

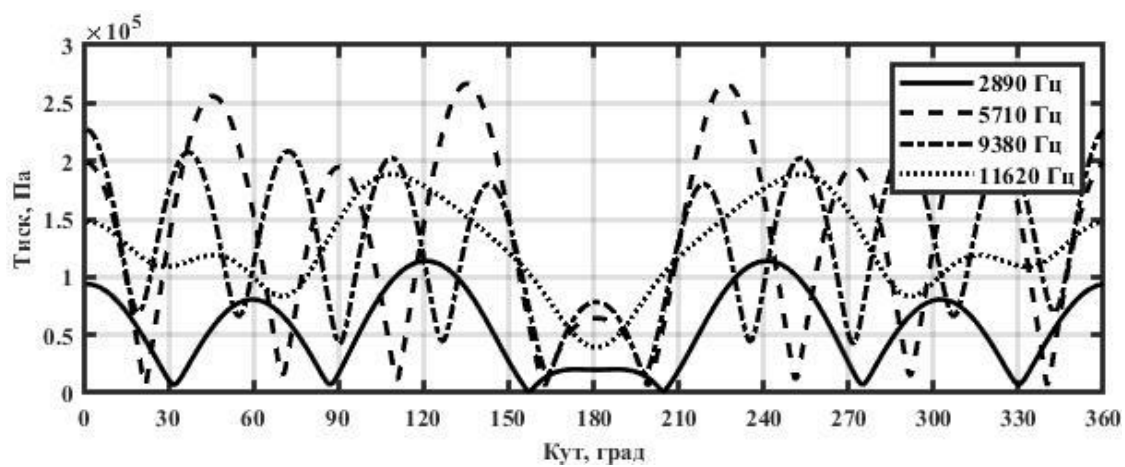
Рис. 3.10 Частотні залежності амплітуд (а, б, в) та фаз (г) акустичного тиску випромінювачів при секторному випромінненні антени з екраном і заповненням внутрішнього об'єму рідинами із

$$\rho_1 c_1 / \rho_c = 1,0 (\text{а, г}); 0,7 (\text{б}); 0,5 (\text{в})$$

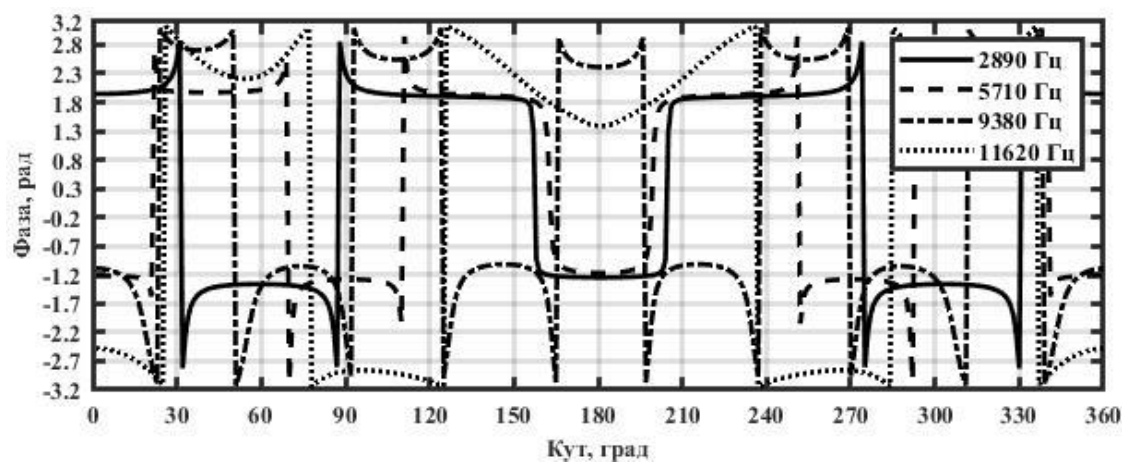
Дійсно, із фізичних уявлень зрозуміло, що одиночний компенсований випромінювач з окружною поляризацією є електромеханічною коливальною системою з радіальносиметричним електричним, механічним і акустичним полями. Тому електрична енергія в його циліндричну п'єзокерамічну оболонку «закачується» лише на нульовій моді його механічних коливань. Розміщення таких випромінювачів у складі кругової антени з екраном при випромінненні ними звуку обумовлює появу багатократно відбитих і розсіяних хвиль від всіх елементів антени, що і є фізичною суттю їх взаємодії по акустичному полю. В кількісному відношенні ця акустична взаємодія залежить в тому числі і від геометрії розміщення елементів в антені, і від фізичних характеристик середовищ у їх внутрішніх об'ємах. Внаслідок появи акустичної взаємодії елементів в досліджуваній антені виникає порушення радіальної симетрії радіаційного (акустичного) навантаження кожного із випромінювачів в круговій антені з екраном. Результатом цього порушення є формування механічного поля кожного із компенсованих випромінювачів кругової антени з екраном не тільки із нульової, але і наступних мод коливань. При цьому природно, що енергія, що «закачується» в випромінювачі лише на нульовій моді коливань, розподіляється в механічному полі між всіма модами.



а)



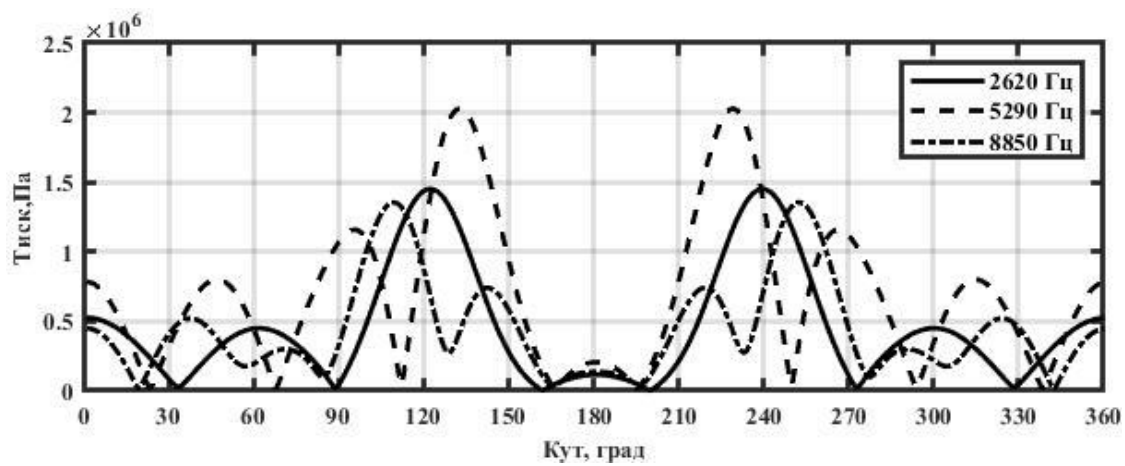
б)



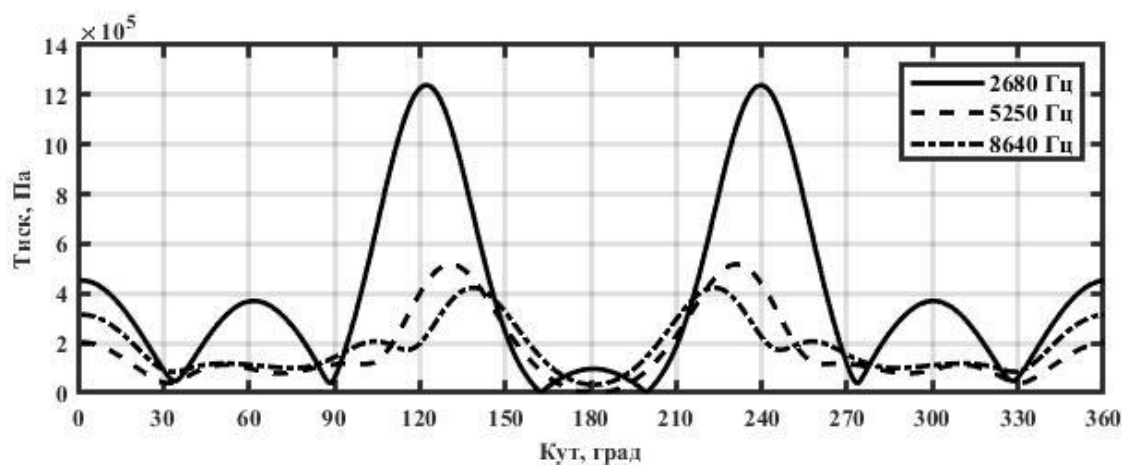
в)

Рис. 3.11 Кутовий розподіл амплітуд (а, б) та фаз акустичного тиску на поверхні компенсованого випромінювача при круговому випромінненні кругової антени з екраном на різних частотах і при

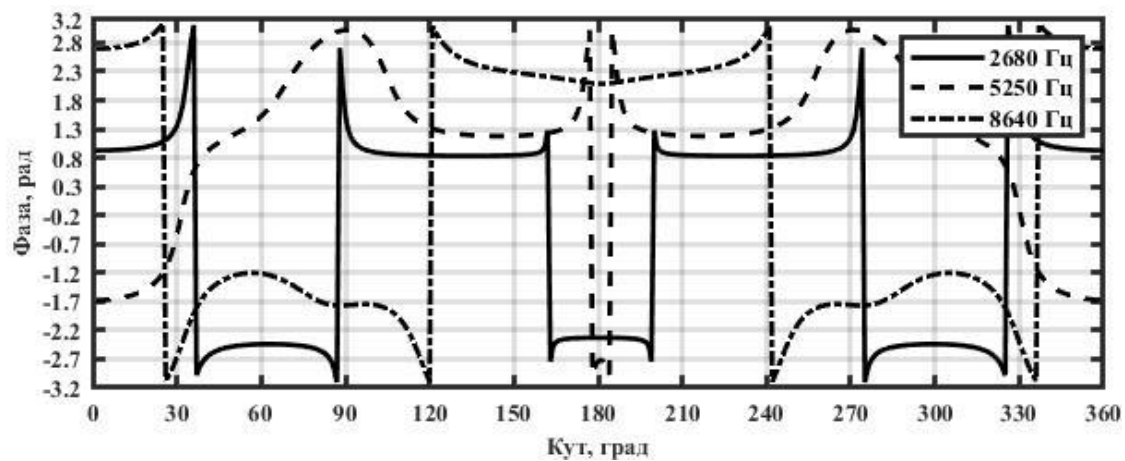
$$\text{різних } \rho_1 c_1 / \rho c = 1,0 (\text{а}); 0,5 (\text{б, в})$$



а)

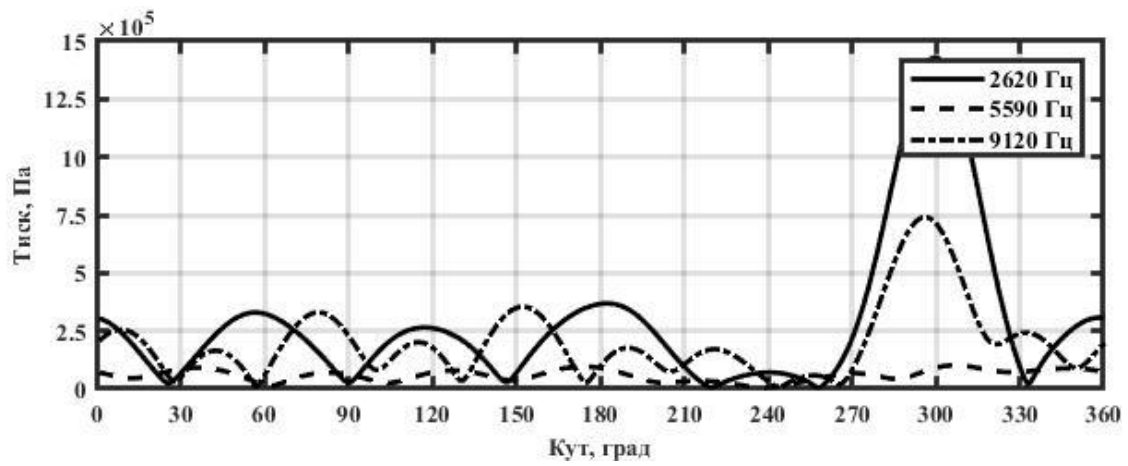


б)

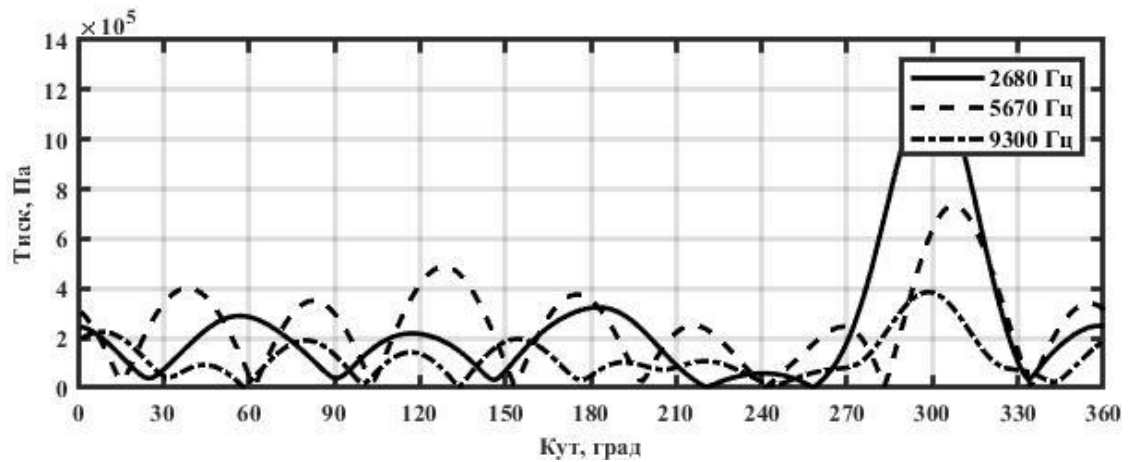


в)

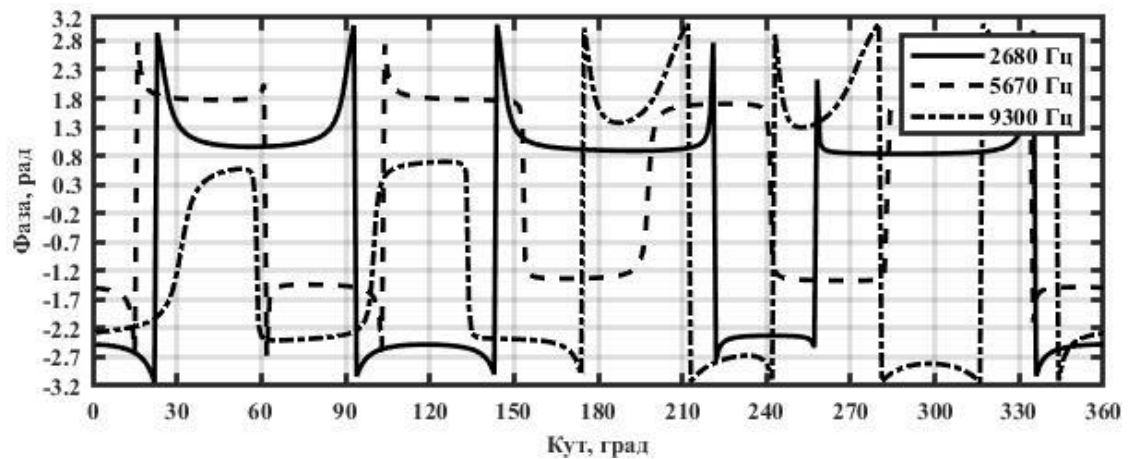
Рис. 3.12 Кутівий розподіл амплітуд (а, б) та фаз (в) акустичного тиску на поверхні середнього компенсованого випромінювача при секторному випромінненні кругової антени з екраном на різних частотах і при різних  $\rho_1 c_1 / \rho c = 1,0$ (а);  $0,5$ (б, в)



а)



б)



в)

Рис. 3.13 Кутовий розподіл амплітуд (а, б) та фаз (в) акустичного тиску на поверхні крайнього компенсованого випромінювача при секторному випромінненні кругової антени з екраном на різних частотах і при різних  $\rho_1 c_1 / \rho c = 1,0$  (а);  $0,5$  (б, в)

Втрату радіальної симетрії акустичного навантаження циліндричними випромінювачами компенсованої конструкції у складі кругової антени з екраном на різних частотах демонструють кутові залежності акустичного тиску на їх зовнішній

поверхні (рис. 3.11 – 3.13). Їх аналіз і співставлення з кривими рис. 3.4 і 3.5 свідчить про наступне. По-перше, якісно по своєму характеру розподіли акустичних тисків на поверхнях силових і компенсованих випромінювачів на близьких по значенню частотах схожі між собою. По-друге, в кількісному відношенні вони суттєво різняться між собою. Для компенсованих випромінювачів ця різниця залежить не тільки від частоти, але і від фізичних характеристик заповнювачів внутрішніх об'ємів випромінювачів і місць розміщення і характеру випромінення кругових антен. При круговому випроміненні (рис. 3.11) всі розподіли акустичного тиску симетричні лише відносно променів  $OO_s$  і мають значне порушення радіальної симетрії, яке збільшується з ростом частоти і падінням значень відношення хвильових опорів  $\rho_1 c_1 / \rho c$ . При секторному випроміненні (рис. 3.12, 3.13) кругової антени з екраном центральний випромінювач антени теж має розподіл акустичного тиску, симетричний лише відносно свого променя  $OO_2$  (рис. 3.12). Ступінь порушення радіальної симетрії розподілу його акустичного тиску залежить від частоти і характеристик внутрішніх середовищ. При цьому зменшення величини  $\rho_1 c_1 / \rho c$  збільшує ступінь порушення радіальної симетрії по мірі зниження робочої частоти антени. Така ж тенденція має місце і для крайніх випромінювачів секторної антени (рис. 3.13). Крім того, для крайніх випромінювачів відсутня будь-яка симетрія розподілу акустичного тиску по їх поверхні.

Як і у випадку кругових антен з екраном, утворених із випромінювачів силової конструкції, наведені вище порушення радіальної симетрії радіаційного випромінення при збереженні її в електричному навантаженні компенсованих випромінювачів стали причиною перетворення одномодового механічного поля одиночних випромінювачів в багатомодове поле їх у складі досліджуваних антен. Природно, що кожна з цих мод механічного поля випромінювачів обумовила появу відповідної складової в акустичному полі антени. Аналіз частотних залежностей акустичного тиску на поверхнях компенсованих випромінювачів у складі кругової антени з екраном (рис. 3.14 – 3.15) дозволяє встановити наступне. В залежності від частоти, характеру електричного збудження випромінювачів в круговій антені і фізичних параметрів їх внутрішніх середовищ одна і та ж енергія, що «закачується»

в випромінювачі на їх нульовій моді, по різному розподіляється між складовими акустичного тиску, відповідаючи різним модам.

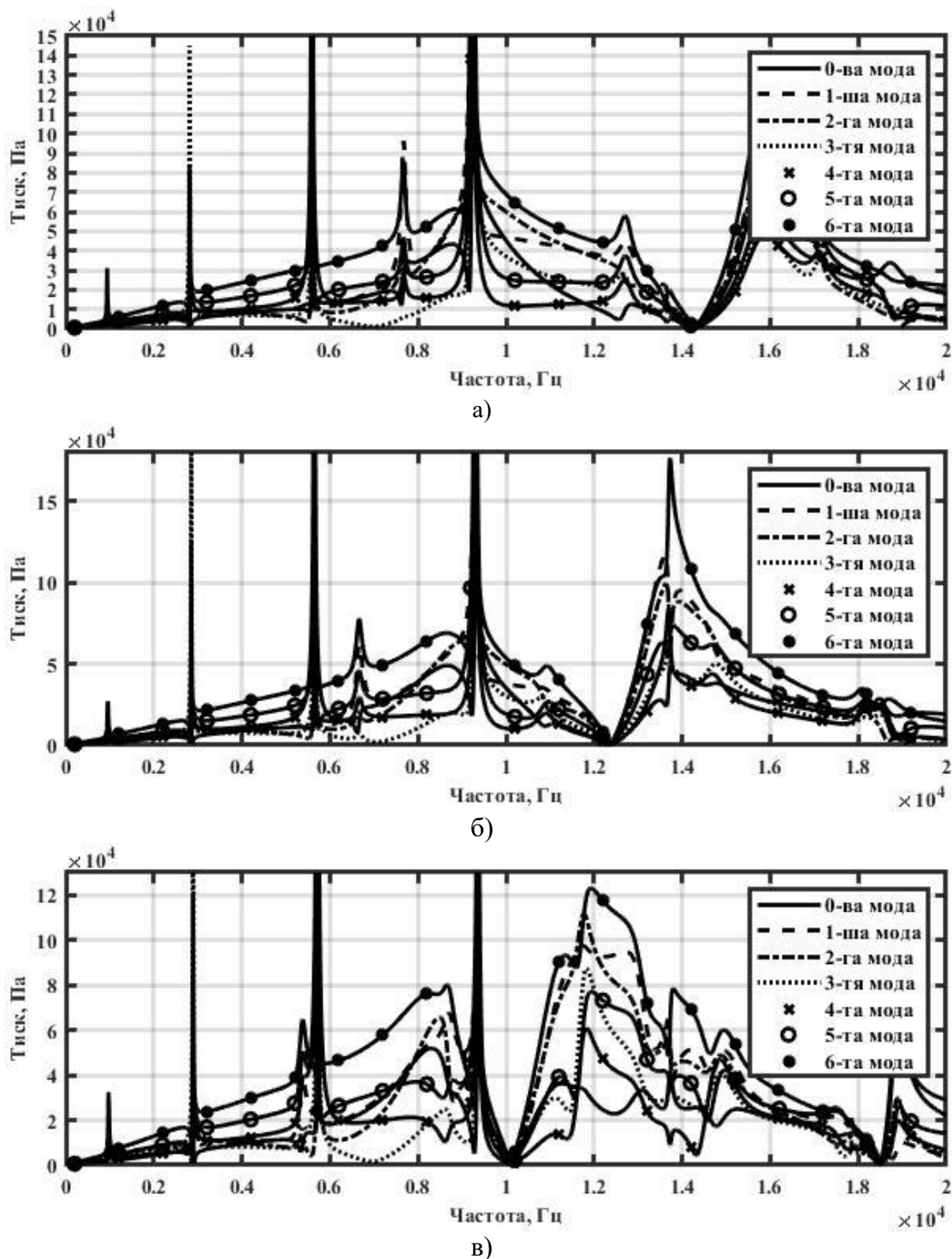
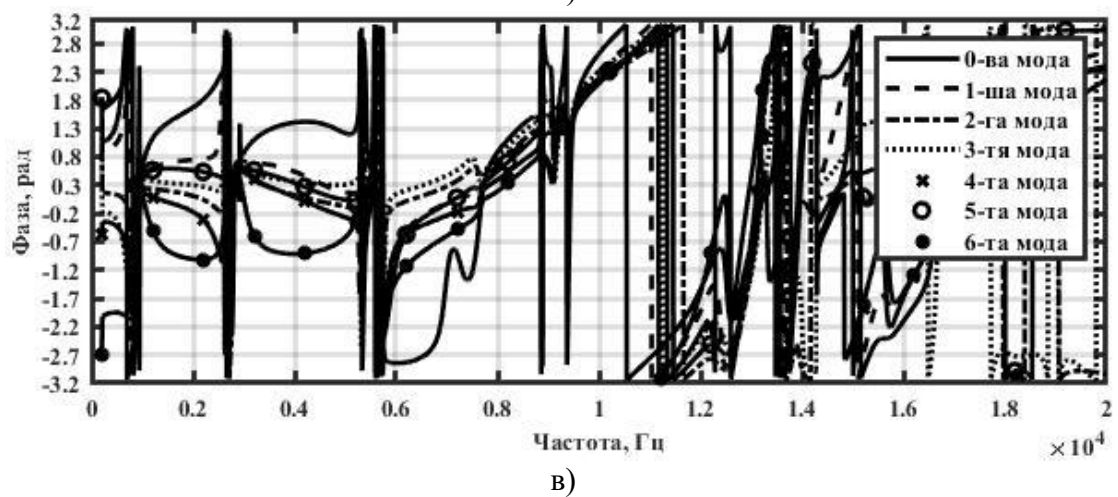
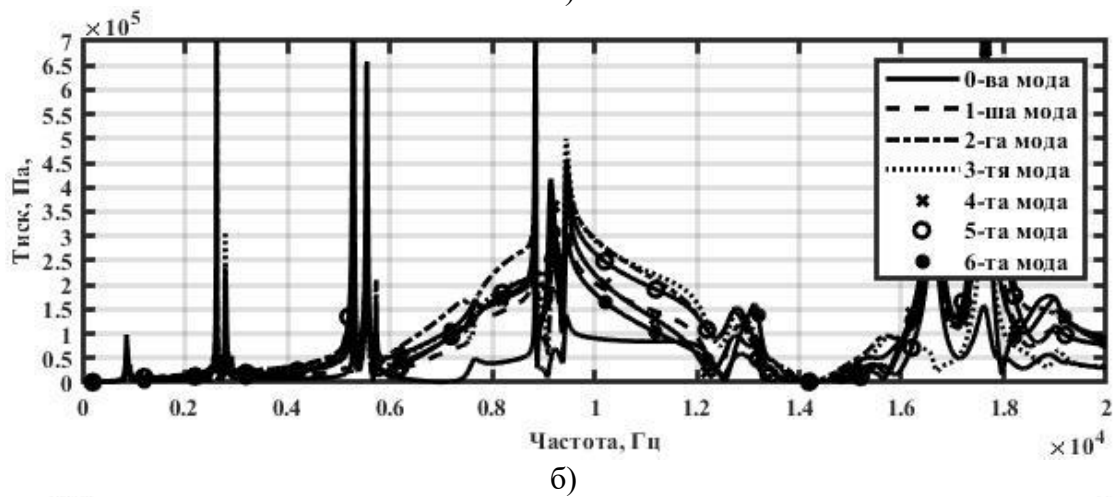
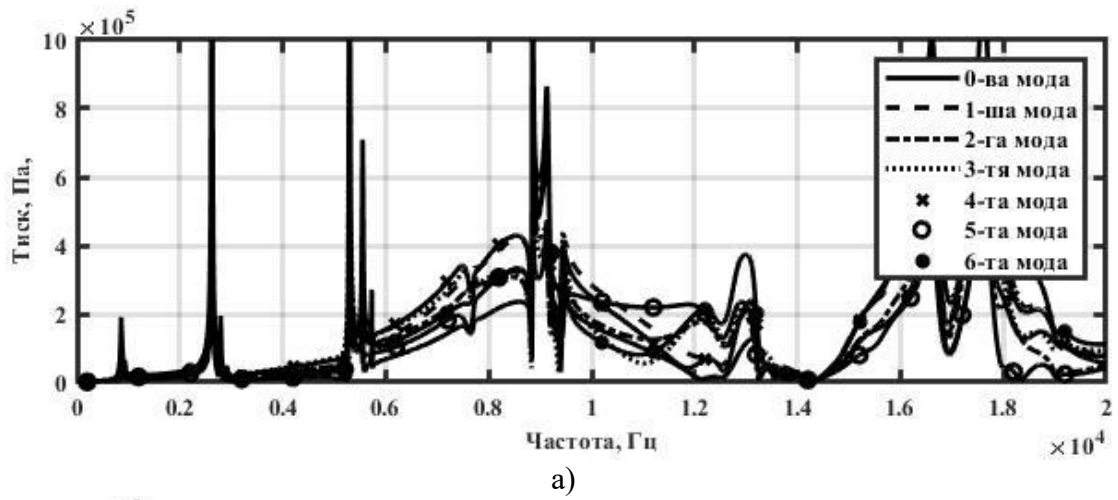


Рис. 3.14 Частотні залежності амплітуд складових акустичного тиску, які відповідають модам коливань компенсованих випромінювачів при круговому випромінненні кругової антени з екраном і  $\rho_1 c_1 / \rho c = 1,0$ (а); 0,7(б); 0,5(в)

В низькочастотних областях (рис. 3.14 – 3.15) акустичні резонанси обумовлені появою високих мод коливань (рис.2. ). Вони теж є вузькосмуговими. Зміна хвильового опору їх внутрішніх середовищ мало змінює їх резонансні частоти, але

суттєво впливає на їх амплітуди, збільшуючи їх в області низьких частот. Крім того, при секторному випромінненні в цій частотній області з'являються (рис. 3.15)





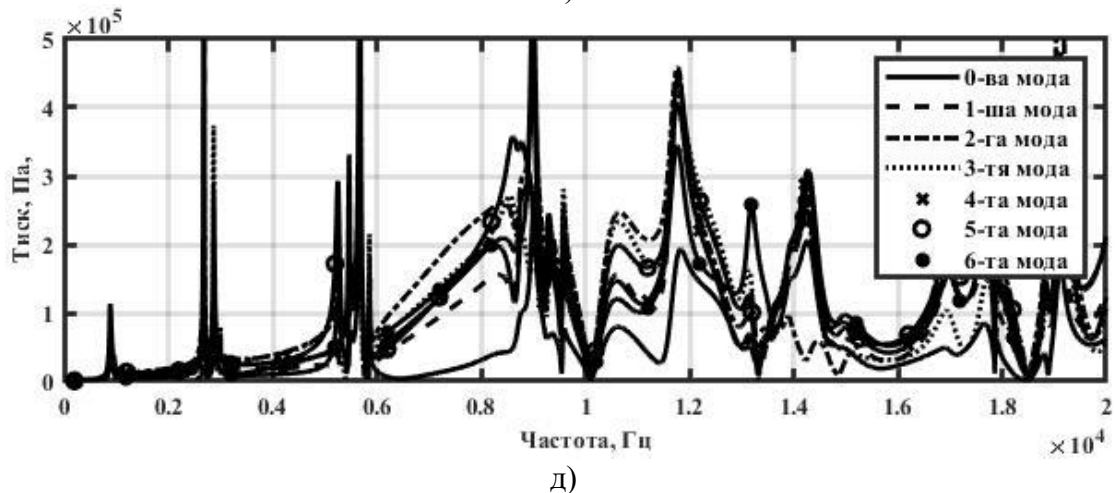
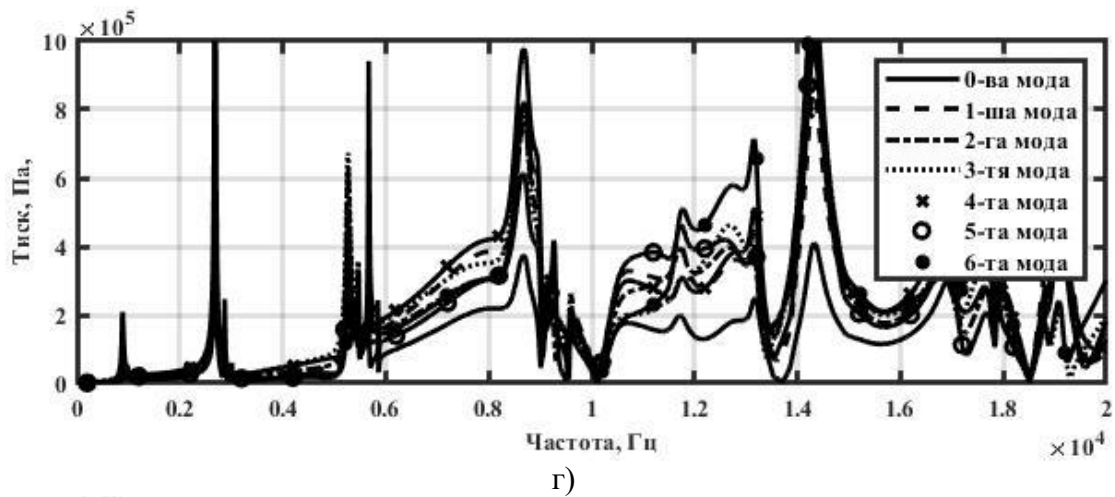


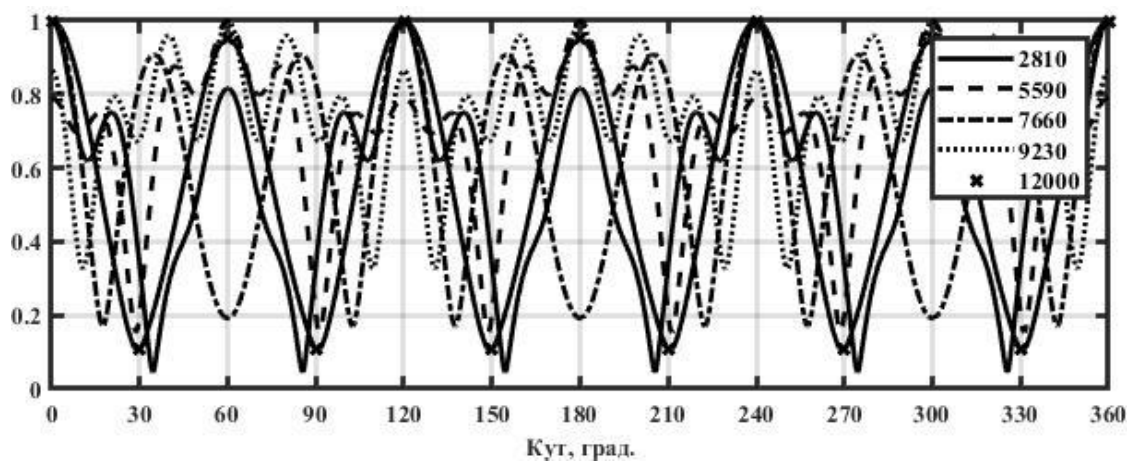
Рис. 3.15 Частотні залежності амплітуд (а, б, г, д) і фаз (в) складових акустичного тиску, які відповідають модам коливань компенсованих випромінювачів кругової антени з екраном при секторному випромінненні для середніх (а, г) і крайніх (б, в, д) випромінювачів  $\rho_1 c_1 / \rho c = 1,0$  (а, б, в);  $0,5$  (г, д)

нові додаткові вузькосмугові резонанси, теж обумовлені різними високими модами коливань. Зменшення відношення  $\rho_1 c_1 / \rho c$  перетворює окремі низькочастотні резонанси (рис. 3.14) в смуги, утворені групами кількох близьких резонансних частот (рис. 3.15).

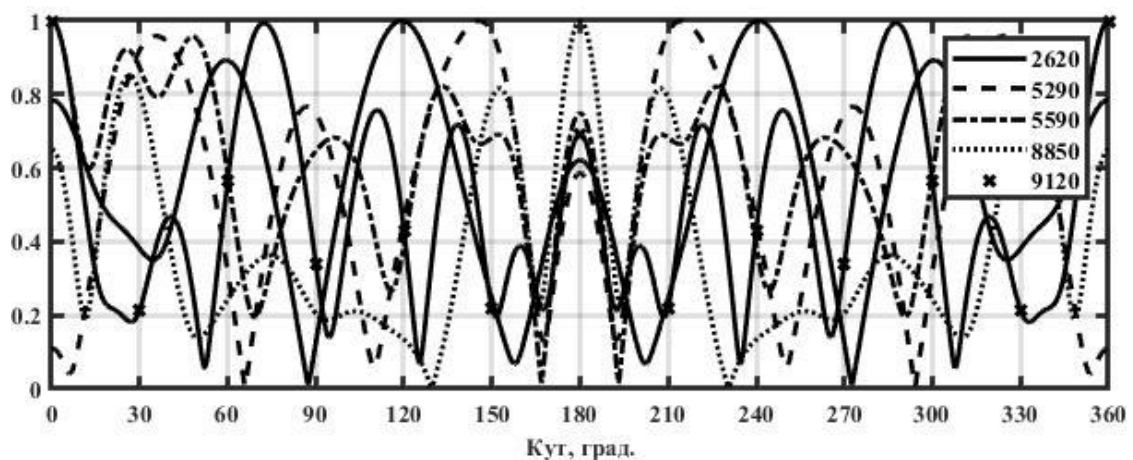
Аналіз резонансної області свідчить про те, наскільки значний об'єм акустичної енергії втрачає нульова мода, віддаючи її складовим акустичного тиску, що відповідають наступним модам коливань. При цьому на частоті резонансу заповненої водою п'єзокерамічної оболонки амплітуди практично всіх складових тиску порівняні між собою, а на інших частотах резонансної області порівняно зі складовою акустичного тиску нульової моди охоплюють значно ширшу смугу частот і в більшості випадків – більші амплітуди тиску. При круговому випромінненні (рис. 3.14) зменшення величини  $\rho_1 c_1 / \rho c$ , по-перше, зменшує смугу

частот ефективного випромінення в резонансній області і, по-друге, ділить резонансну область (рис. 3.14 в) на 2 частини, у другій з яких резонансне випромінення суттєво зростає (рис. 3.14 б, в). При секторному випроміненні (рис.3.15) резонансна область перетворюється, особливо при  $\rho_1 c_1$ , менших  $\rho c$ , велику кількість резонансних частот з вузькими і широкими смугами. В високочастотній області при круговому випроміненні виникає ще одна резонансна область (рис. 3.14), яка по мірі зменшення відношення  $\rho_1 c_1 / \rho c$  пересувається в резонансну область. При цьому кожна зі складових акустичного тиску формує суттєво більшу резонансну смугу (рис.3.14 в). При секторному випроміненні (рис.3.15) високочастотна область поділяється на ряд резонансних областей (рис. 3.15 а, б, в), кількість яких при зменшенні величини  $\rho_1 c_1 / \rho c$  значно збільшується. При цьому у всіх розглянутих випадках амплітуди акустичного тиску нульової моди значно нижчі, навіть найнижчі, порівняно із амплітудами тисків, що відповідають наступним модам. Це свідчить про ефективний розподіл енергії акустичного поля між всіма акустичними складовими, що відповідають різним модам, в діапазоні робочих частот кругової антени з екраном.

Розглянемо тепер, як впливають встановлені особливості акустичних полів випромінювачів компенсованої конструкції на формування акустичних полів кругової антени з екраном в дальньому полі. Аналіз результатів розрахунків (рис. 3.16) і співставлення їх з розрахунками розподілів акустичного поля в дальній зоні антени, утвореної із випромінювачів силової конструкції (рис. 3.8), показує, що як при круговому, так і секторному випроміненні для однакових інших параметрів і близьких частот практично мало відрізняються між собою. Тому всі висновки, встановлені в попередньому підрозділі, відносяться і для антен з компенсованими випромінювачами.



а)



б)

Рис. 3.16 Кутові залежності акустичного тиску кругової антени з екраном в дальньому полі при круговому (а) ті секторному (б) випромінненні водозаповнених випромінювачів на різних частотах

### 3.4 Властивості акустичних полів кругових циліндричних антен з екраном в залежності від складу застосованої в конструкції випромінювачів п'єзокераміки та її поляризації

Однією із важливих складових параметрів конструкції кругових антен з екраном є склад активних елементів їх випромінювачів – складу п'єзокераміки та характеру її поляризації. В попередніх підрозділах кількісно досліджувалися властивості акустичних полів кругових антен з екраном для одного із поширених в застосуванні складів п'єзокераміки – ЦТБС-3 при окружній поляризації. Визначимо тепер, як в кількісному відношенні впливає на формування акустичного поля антеною заміна в її випромінювачах складу п'єзокераміки та виду поляризації. При проведенні розрахунків полів обиралися наступні варіанти: склад п'єзокераміки ЦТС-19 або

ТБК-3 при окружній поляризації і п'єзокераміка ЦТБС-3 при радіальній поляризації. Такий вибір дозволяє порівнювати нові чисельні результати з отриманими раніше і таким чином встановити шукані залежності в закономірностях впливу цих конструктивних параметрів на взаємодію різних фізичних полів в круговій антені з екраном. Розрахунки акустичних полів виконувалися для вище наведених параметрів і характеристик антен і випромінювачів і наступних значень електрофізичних параметрів для п'єзокераміки типу: ЦТС-19 –  $C_{33}^E = 9,3 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ ;  $\varepsilon_{33}^S / \varepsilon_0 = 935$ ;  $d_{33} = 304 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н}$ ;  $\gamma = 7740 \text{ кг/м}^3$ ; ТБК-3 –  $C_{33}^E = 15,3 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ ;  $\varepsilon_{33}^S / \varepsilon_0 = 950$ ;  $d_{33} = 121 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н}$ ;  $\gamma = 5400 \text{ кг/м}^3$ . При цьому розглядалися кругові антени з екраном і круговим і секторним випроміненням, утворені із випромінювачів силової або компенсованої конструкцій. На рис. 3.17 – 3.19 представлені розрахункові дані для досліджуваних антен з вакуумованими випромінювачами і секторним режимом випромінення. Співставлення їх між собою і з кривими рис.3.2 дозволяє визначити вплив складу п'єзокераміки на процеси взаємодії полів.

Аналіз кривих рис. 3.17 і 3.2 показує, що зміна складу п'єзокераміки в конструкції випромінювачів змінює як форму частотних залежностей амплітуд акустичного тиску, так і кількісні значення як власних резонансних частот, так і величину їх амплітуд. Але при цьому встановлені раніше особливості акустичних полів антен з екраном якісно зберігаються, хоча і мають певні кількісні зміни. Так, кількість додаткових резонансів майже не змінюється. Але змінюються частоти резонансів та їх резонансні смуги. Для антен із п'єзокераміки складу ЦТС-19 має місце найбільший зсув частот додаткових резонансів в бік низьких частот (рис. 3.17 а). Найбільші зміни форми частотних залежностей середніх і крайніх випромінювачів в круговій антені з екраном виникають при застосуванні в конструкції випромінювачів

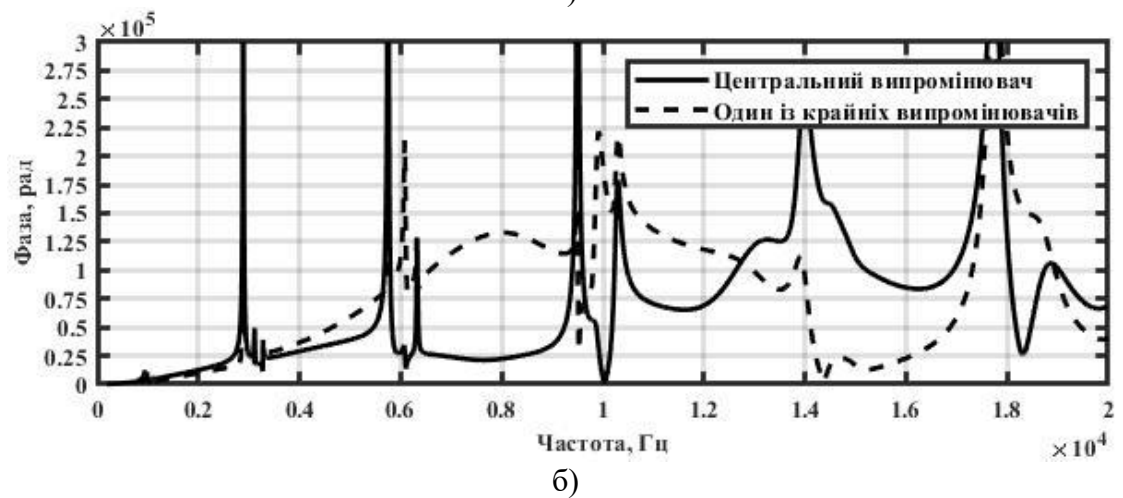
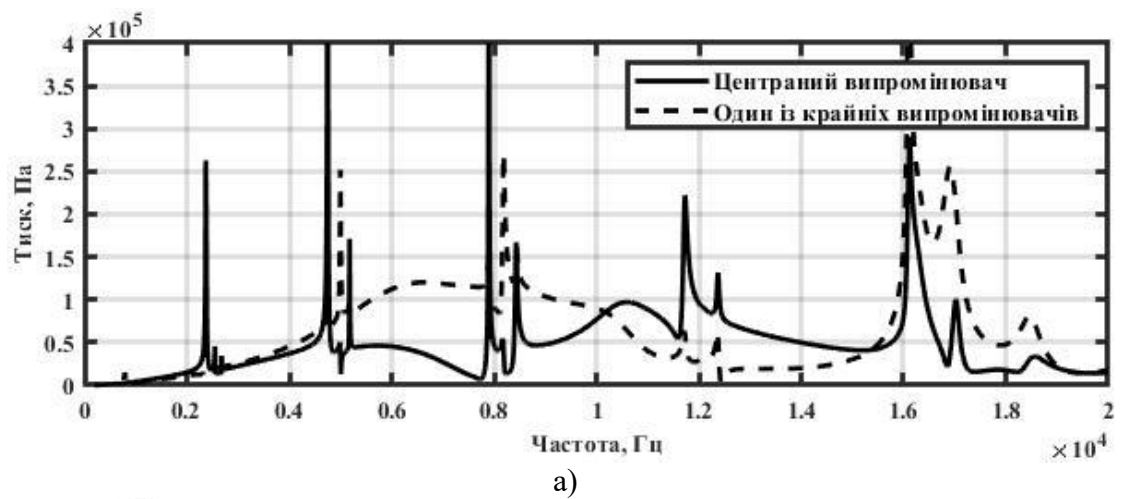
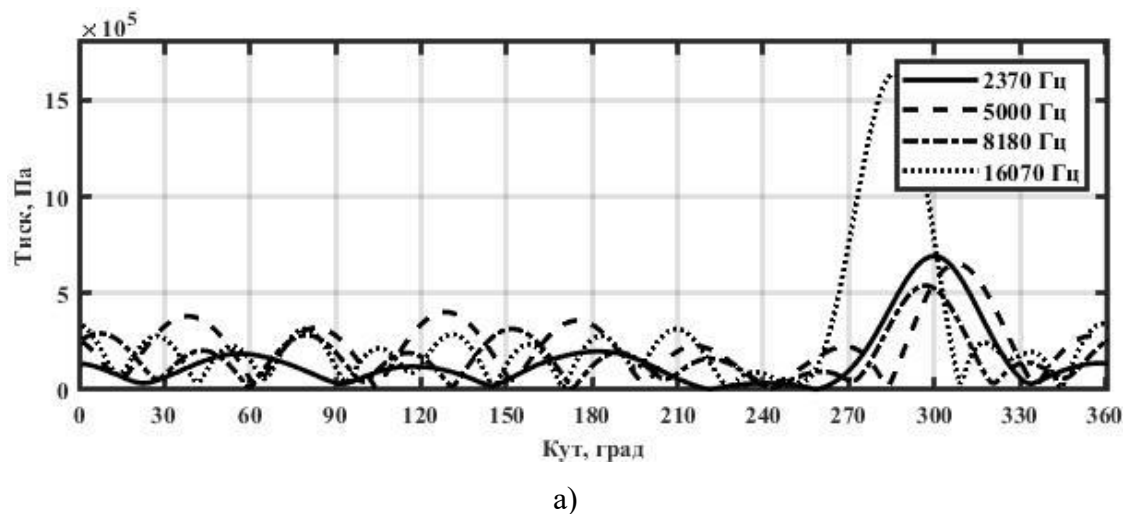
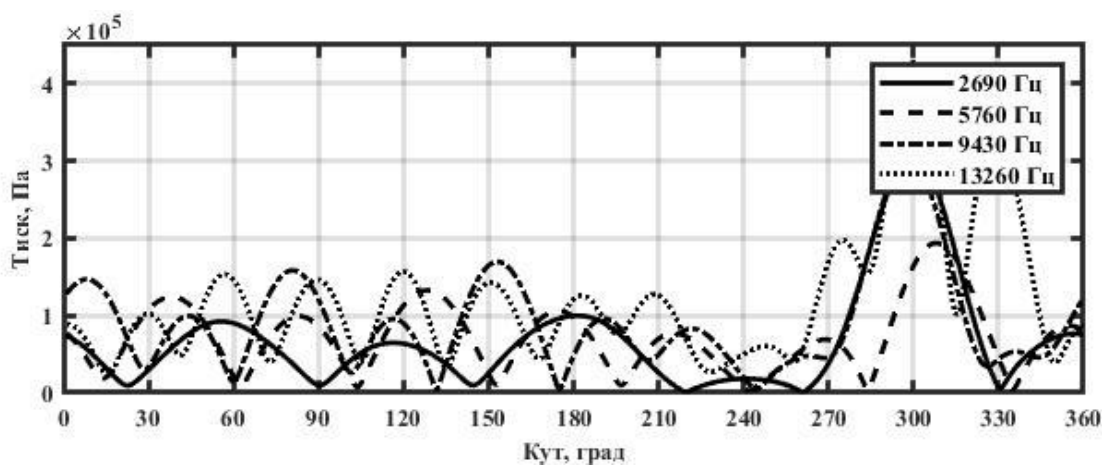


Рис. 3.17 Частотні залежності амплітуд акустичного тиску вакуумованих випромінювачів при секторному випромінненні антен з екраном і складі п'єзокераміки ЦТС-19 (а) та ЦТБС-3 (б)





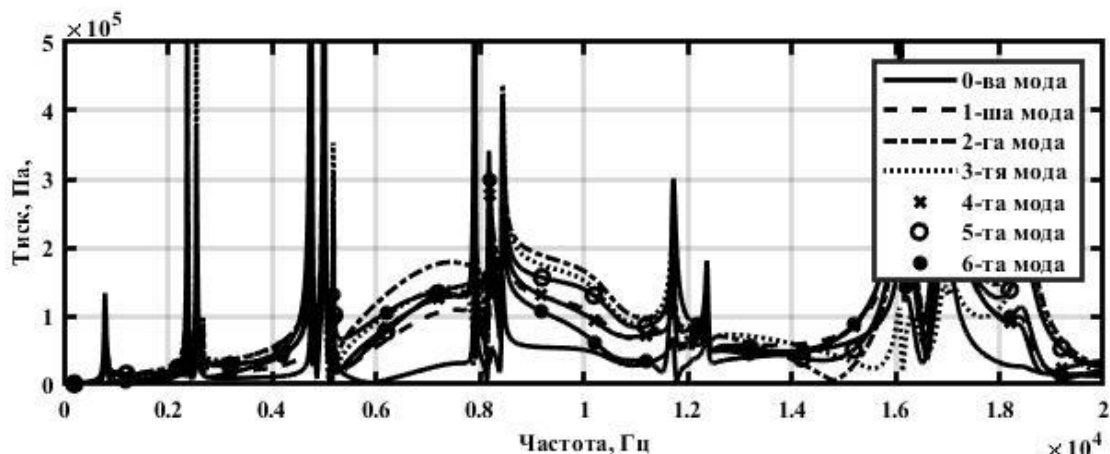
б)

Рис. 3.18 Кутовий розподіл амплітуд акустичного тиску на поверхні вакуумованого крайнього випромінювача при секторному випромінненні кругової антени з екраном і складі п'єзокераміки ЦТС-19 (а) та ТБК-3 (б)

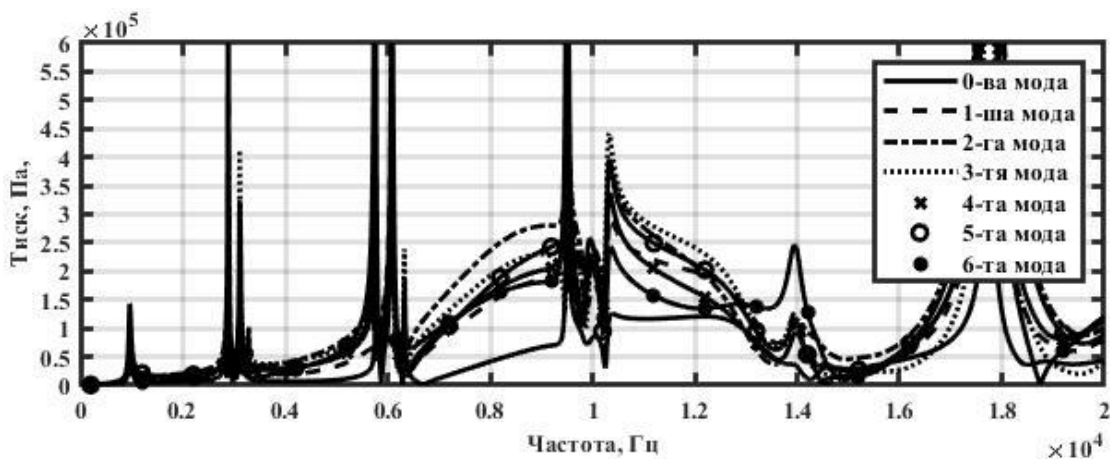
п'єзокераміки складу ТБК-3. Встановлені закономірності зберігаються як при круговому випромінненні, так і при переході від силових конструкцій випромінювачів до компенсованих. Таким чином, наведені результати дозволяють зробити висновок, що вибором складу п'єзокераміки можливо керувати частотною залежністю амплітуди акустичного поля.

Зміна складу п'єзокераміки в конструкції випромінювача не змінює умов формування фізичних полів в кругових антенах з екраном. В їх акустичному полі діють ефекти взаємодії випромінювачів між собою, між випромінювачами та екраном і між випромінювачами і оточуючим середовищем, обумовлені випромінненням і відбиттям від елементів антени звукових хвиль. Ці ефекти обумовлюють таке акустичне навантаження кожного із циліндричних випромінювачів у складі антени, при якому про радіальну симетрію не може бути і мови. Про це свідчать криві рис. 3.18. Їх аналіз свідчить, що як і у випадку застосування в конструкції випромінювачів п'єзокераміки складу ЦТБС-3 (рис. 3.4 – 3.5) акустична взаємодія елементів антени і при інших складових п'єзокераміки порушує радіальну симетрію акустичного навантаження випромінювачів. Вплив складу проявляється лише в кількісному значенні порушення радіальної симетрії. При близьких частотах більшою нерівномірністю кутового розподілу акустичного

тиску по поверхні випромінювачів у складі антени відзначається п'єзокераміка складу ЦТС-19 (рис. 3.18 а).



а)



б)

Рис. 3.19 Частотні залежності амплітуд складових акустичного тиску, які відповідають модам коливань вакуумованих випромінювачів при секторному випромінненні кругової антени з екраном і складі п'єзокераміки ЦТС-19 (а) та ТБК-3 (б)

Таким чином, при зміні складу п'єзокераміки в конструкції випромінювачів кругової антени з екраном залишаються два фізичні фактори:

- радіальна симетрія електричного поля, обумовлена вибраною схемою електричного збудження випромінювачів антени;
- порушення радіальної симетрії акустичного навантаження випромінювачів у складі кругової антени з екраном.

Як вже було встановлено вище, саме ці два фактори обумовлюють появу в акустичному полі випромінювачів у складі досліджуваної антени наступних за нульовою акустичних складових мод коливань. Кількісні співвідношення між їх

амплітудами і фазами на різних частотах визначаються багатьма факторами. Рис. 3.19 і 3.7 демонструють вплив на ці кількісні співвідношення складу п'єзокераміки. Аналіз наведених на них кривих свідчить про те, що склад п'єзокераміки суттєво впливає на втрату енергетичної ефективності нульовою модою. Причому ця втрата суттєво залежить ще і від вибору частотного діапазону. Найбільшою енергетичною ефективністю у всьому діапазоні частот відзначається нульова мода випромінювачів із п'єзокераміки ТБК-3 (рис. 3.19 б). За нею йде п'єзокераміка ЦТС-19 (рис. 3.19 а). Найменш ефективною є п'єзокераміка ЦТБС-3 (рис. 3.7).

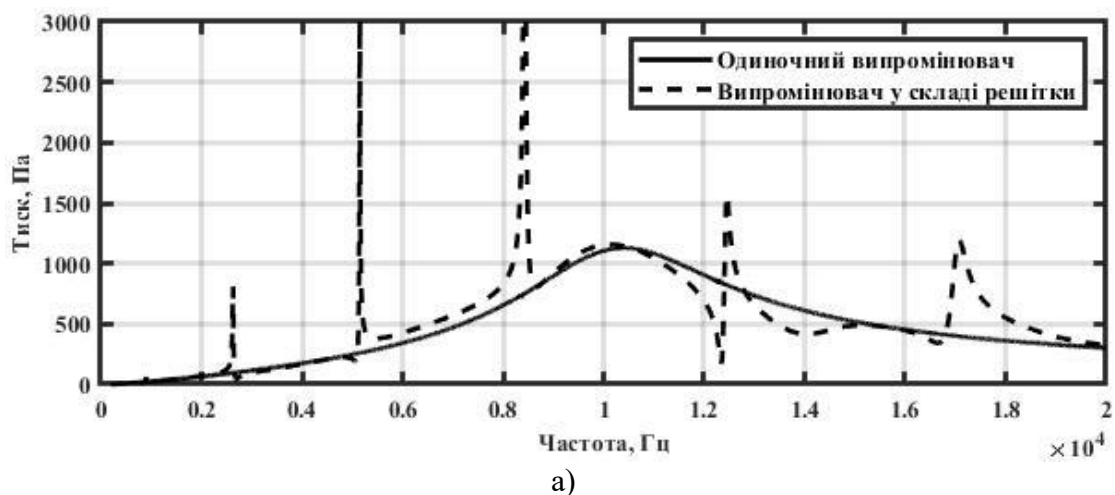
З активним матеріалом випромінювачів пов'язаний не тільки склад п'єзокераміки, але і її поляризація. До цього часу досліджувалися кругові антени з екраном, утворені із випромінювачів з окружною поляризацією. Це обумовлено тим, що при такій поляризації будь-яка п'єзокераміка відзначається найбільшими енергетичними можливостями, хоча і потребує значно складніших технологічних процесів для її реалізації. Але випромінювачі з радіальною поляризацією також знаходять широке застосування в практичній гідроакустиці. Тому представляється доцільним дослідити вплив і цієї конструктивної характеристики антени на випромінення сигналів круговою антеною з екраном. Для співставлення характеристик кругових антен з екраном, але при різній поляризації їх випромінювачів всі розрахунки виконувалися для тих самих параметрів, що наведені в підрозділах 3.2 і 3.3. Деякі з цих розрахунків наведені на рис. 3.20 – 3.22. Їх співставлення з відповідними результатами для випромінювачів з окружною поляризацією дозволяє зробити наступні висновки. Зміна поляризації п'єзокерамічних елементів випромінювачів у складі кругової антени з екраном є ще однією з характеристик конструкції випромінювачів, яка дозволяє керувати певним чином випроміненням сигналів досліджуваною антеною. Як видно із співставлення кривих рис. 3.20 а і 3.1 а, при радіальній поляризації частотні залежності тиску на поверхнях випромінювачів у складі кругової антени з екраном при круговому випроміненні також приймають складну форму порівняно з одиночним випромінювачем. В областях низьких і високих частот з'являються додаткові акустичні резонанси. Їх частоти більш низькі, а смуги більш вузькі ніж у



випромінювачів із окружною поляризацією. Резонансні ж області випромінювачів одиночного і у складі антени при цьому по формі більш близькі між собою. При переході до секторного випромінювання частотні залежності при радіальній поляризації змінюються (рис. 3.20 і 3.2) ще більш радикальним чином як для середніх, так і для крайніх випромінювачів досліджуваної антени. Резонансні частоти сповзають вниз на (25 – 30) відсотків, а амплітуди очікувано зменшуються в (1,4 – 1,5) разів.

Перехід від силових (рис. 3.20 а, б) до компенсованих (рис. 3.20 в) конструкцій випромінювачів з радіальною поляризацією зберігає тенденцію зменшення резонансних частот додаткових акустичних резонансів порівняно з випромінювачами із окружною поляризацією (рис. 3.12 і 3.13), додає кількість цих резонансів в області високих частот і здійснює подальший вплив на зменшення амплітуди акустичного тиску у всьому частотному діапазоні.

Як і при окружній поляризації, фізичною причиною таких змін в частотній залежності акустичного тиску у випромінювачів з радіальною поляризацією при їх роботі у складі досліджуваної антени є наявність радіальної симетрії у цих



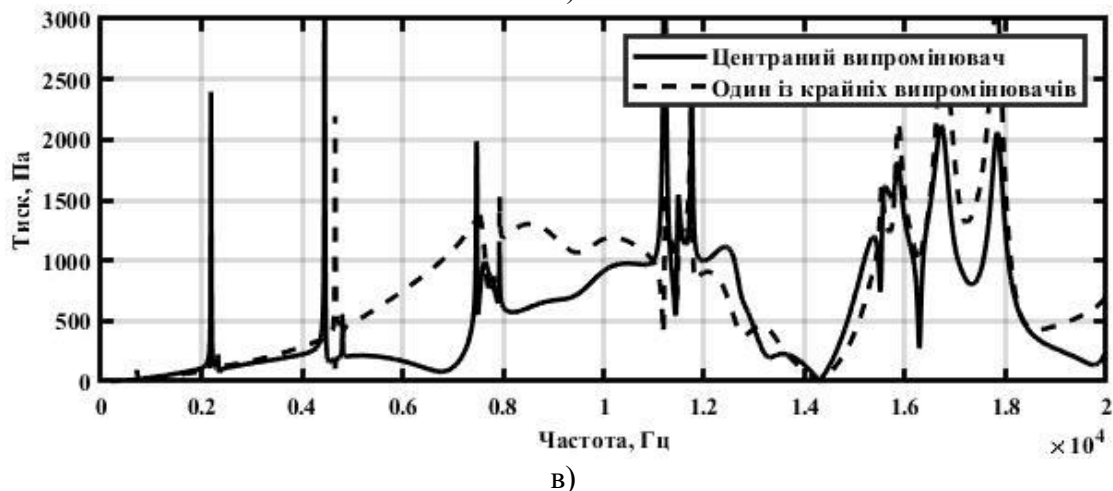
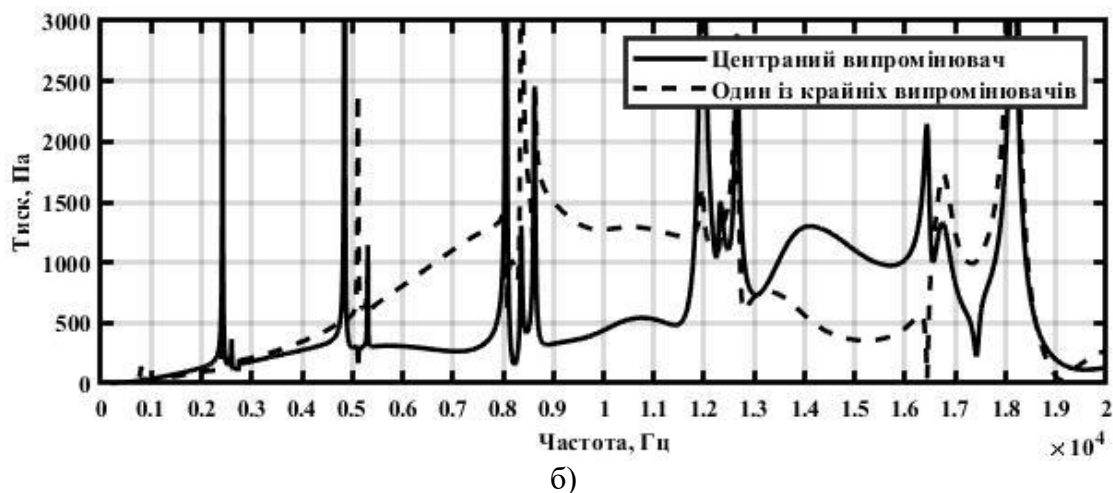


Рис.3.20 Частотні залежності амплітуд акустичного тиску вакуумованих (а, б) та заповнених водою (в) випромінювачів при круговому (а) та секторному (б, в) випромінненні кругової антени з екраном

випромінювачів електричного навантаження у зв'язку із вибраною схемою електричного збудження і втрату цієї симетрії у акустичного навантаження випромінювачів у зв'язку із появою акустичної взаємодії між всіма елементами антени, обумовленої багаторазовим перевідбиттям в антені випромінених звукових хвиль. Цю втрату радіальної симетрії акустичного навантаження випромінювачами з радіальною поляризацією у складі кругової антени з екраном на різних частотах демонструють криві рис. 3.21. Їх аналіз показує, що степінь втрати радіальної симетрії акустичного навантаження випромінювачів в досліджуваній антені суттєво залежить від її робочої частоти і збільшується при зростанні частоти. Змінюється кількісно ця степінь в залежності від характеру організації випроміннення в антені (рис. 3.21 а, б), і від типу конструкції випромінювачів – силової(рис. 3.21 а, б) і компенсованої (рис. 3.21 в). При

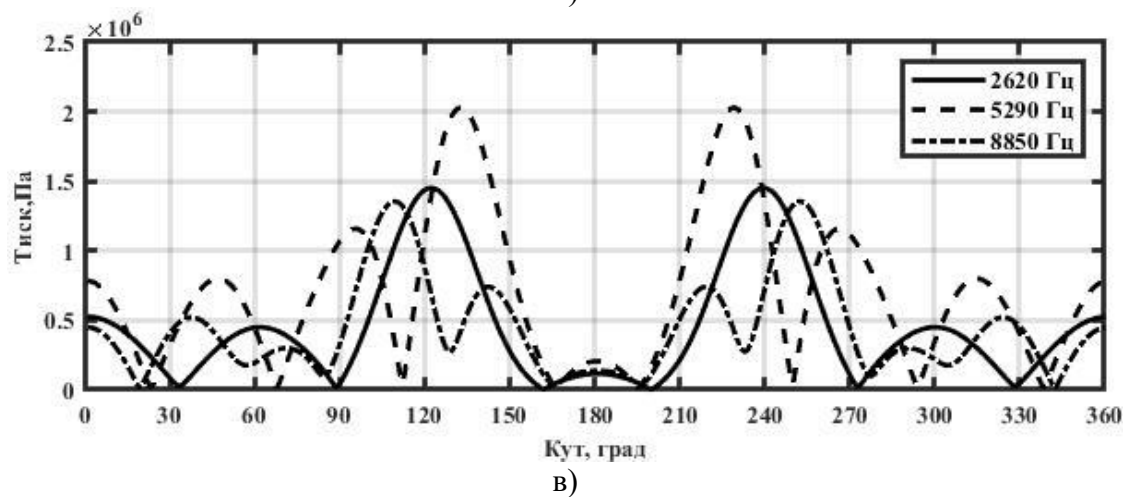
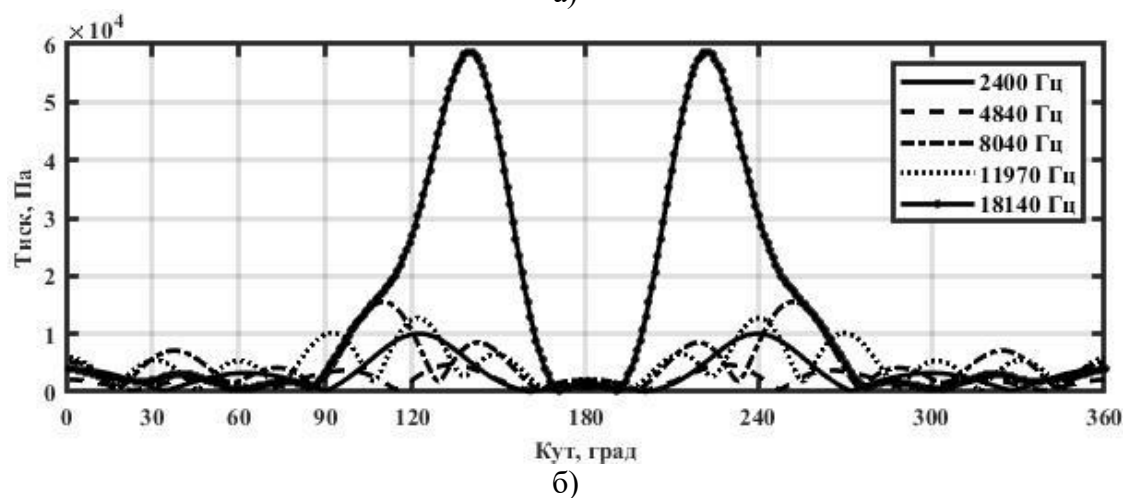
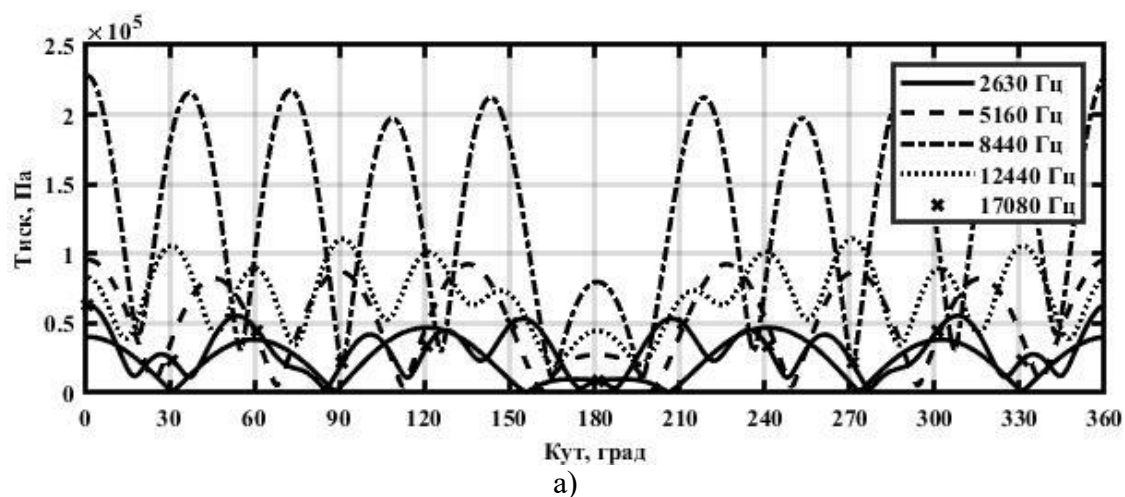


Рис.3.23 Кутовий розподіл амплітуд акустичного тиску на поверхнях заповнених повітрям(а, б) та водою (в) випромінювачів при круговому (а) і секторному (б, в) випромінненні кругової антени з екраном

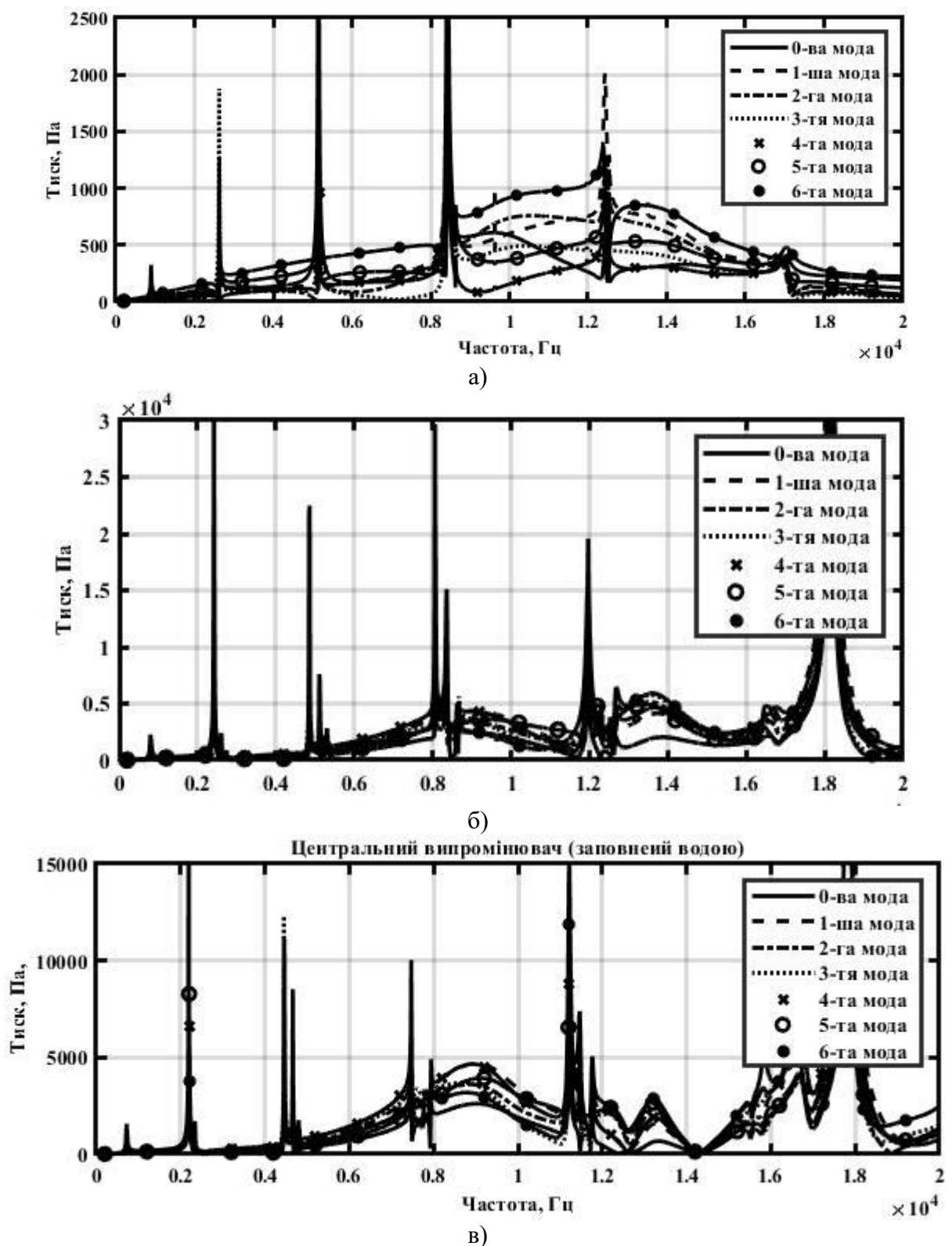


Рис. 3.22 Частотні залежності амплітуд складових акустичного тиску, які відповідають модам коливань заповнених повітрям (а, б) та водою (в) випромінювачів, при круговому (а) та секторному (б, в) випромінненні кругової антени з екраном

цьому в останньому випадку степінь втрати радіальної симетрії збільшується, починаючи з області низьких частот. Співставлення між собою втрат радіальної симетрії акустичного навантаження в досліджуваних антенах в залежності від окружної (рис. 3.4 і 3.5) та радіальної (рис. 3.21) поляризації їх випромінювачів

свідчить про те, що при окружній поляризації нерівномірність акустичного навантаження випромінювачів є більшою.

### 3.5 Властивості акустичних полів кругових циліндричних антен з екраном в залежності від деяких конструктивних характеристики антен

Доповнимо встановлені раніше властивості акустичних полів кругових циліндричних антен з екраном результатами досліджень їх залежностей від розмірів акустичних екранів і кількості випромінювачів у складі антен. Для забезпечення можливості співставлення нових залежностей з раніше одержаними розрахунки акустичних полів виконувались для тих параметрів випромінювачів, які використовувалися раніше, і нових значень: п'єзокераміки складу ЦТБС-3; поляризація – окружна;  $N = 4; 5$ ;  $r_{0N+1} = 3r_0; 5r_0$ ;  $R = r_{0N+1} + 0,071m$ ; випромінювання кругове і секторне; внутрішнє заповнення конструкцій випромінювачів – вакуум; повітря за нормального атмосферного тиску; вода. Досліджувані характеристики акустичного поля такі ж самі, що й раніше.

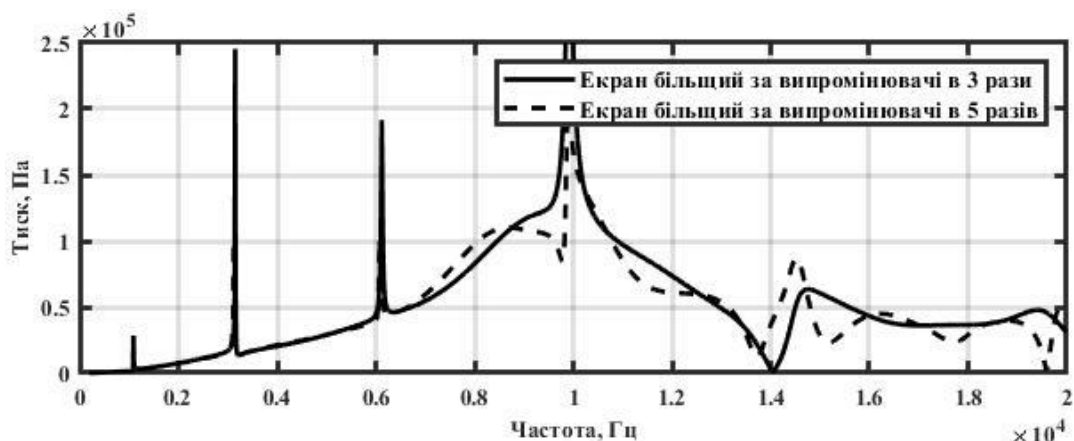
Перш ніж аналізувати нові одержані результати зауважимо наступне. Раніше було встановлено, що на електромеханоакустичне перетворення енергії в антені суттєвий вплив має взаємодія акустичних полів її елементів, обумовлена багатократним обміном між ними випроміненими і відбитими звуковими хвилями. При цьому до уваги приймалися дві компоненти взаємодії в антені з екраном – між випромінювачами і між випромінювачами і екраном. Перша визначалась врахуванням в співвідношеннях (1.22) і (1.30) функції  $H_{n-m}^{(1)}(kr_{qs})$ , друга – функції  $H_{n-m}^{(1)}(kr_{SN+1})$ ,  $q, S = 1, \dots, N$ .

Тому зміна розмірів екрану при збереженні сталими всіх інших параметрів антен дозволяє дослідити вплив на акустичні поля акустичної взаємодії між випромінювачами і екраном, а зміна кількості випромінювачів в антен – такий же вплив акустичної взаємодії між випромінювачами.

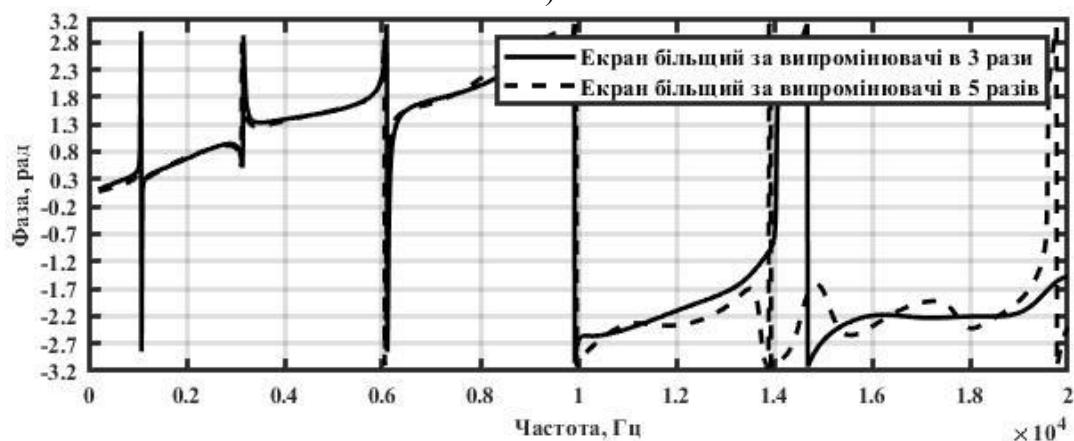
Спочатку дослідимо властивості акустичних полів кругової антени з екраном в залежності від розмірів такого важливого елемента конструкції антени як її акустичний екран. Результати виконаних розрахунків представлені на рис 3.23 ÷

3.25. Їх співставлення з графіками рис 3. 1 ÷ 3.7 дозволяє дослідити вплив на досліджувані акустичні поля зміни розмірів акустичного екрану від  $r_{0N+1} = r_0$  до  $r_{0N+1} = 5r_0$ .

Аналіз графіків рис. 3.1, 3.12 і 3.23 свідчить про те, що при круговому випромінненні звуку збільшення розмірів м'якого екрану мало впливає на форму частотної залежності коливальної швидкості випромінювачів у складі кругової антени з екраном. Частоти додаткових низькочастотних резонансів залишаються незмінними (рис. 3.1 а і 3.23). Мало змінюються ці залежності і в резонансній області. Основні зміни і амплітудної і фазової частотних залежностей мають місце в високочастотній області. Зміна характеристик пружного середовища, що заповнює внутрішні порожнини випромінювачів, мало впливає на акустичну взаємодію випромінювачів з екраном.



а)



б)

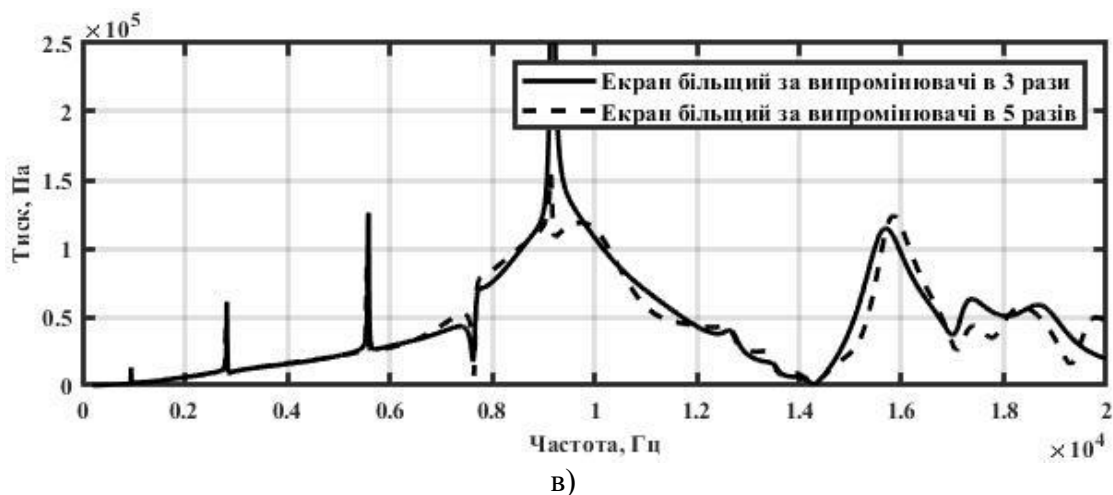
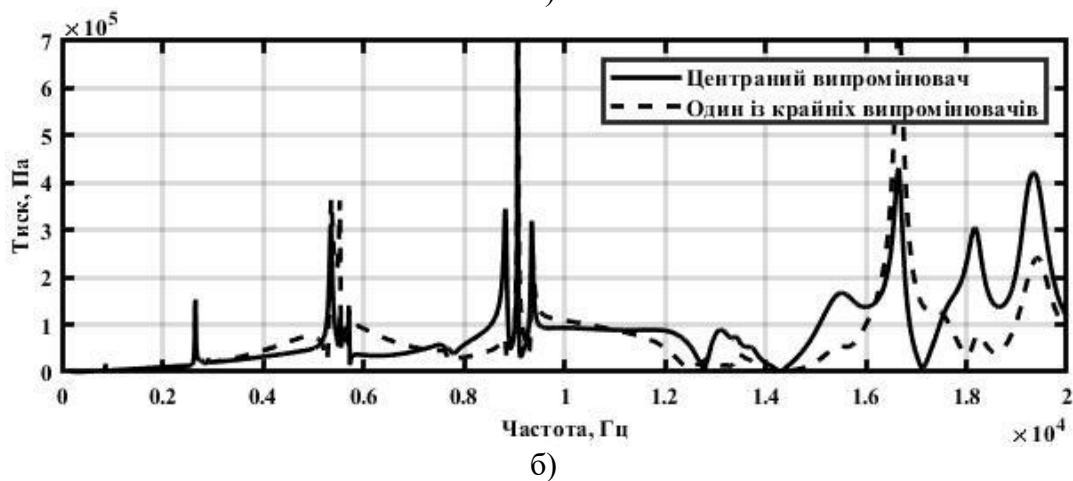
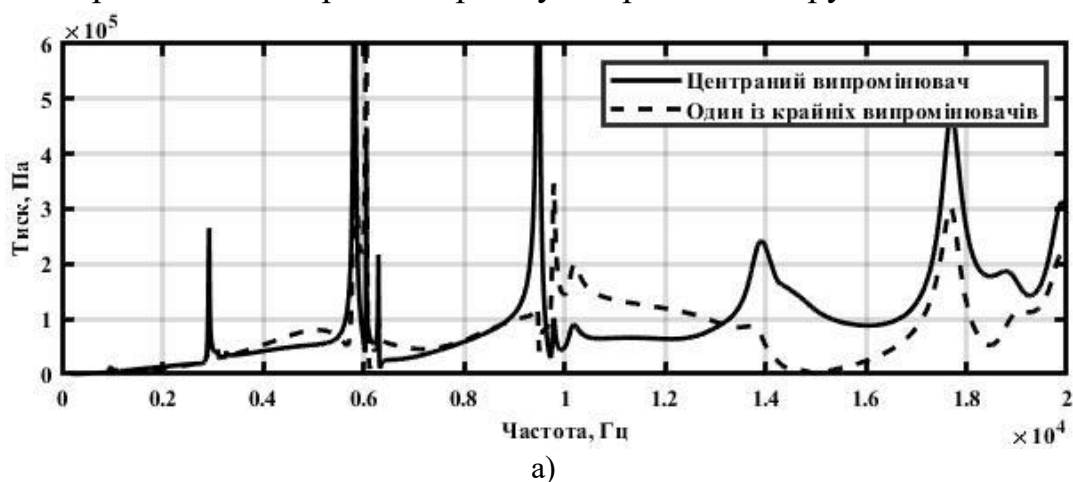


Рис. 3.23 Частотні залежності амплітуд (а, в) та фаз (б) акустичного тиску вакуумованих (а, б) та водозаповнених випромінювачів при круговому випромінненні трьохелементної антени з екраном, різних геометричних розмірів

Зміна розмірів екрану при переході від кругового випроміннення звуку до секторного (рис. 3.2 і 3.24), по-перше, залишає дійсним ефект суттєвої зміни акустичної взаємодії між випромінювачами антени та рівня її впливу на акустичні поля, і, по-друге, мало впливає на форму амплітудно-фазових частотних залежностей випромінювачів при секторному випромінненні кругової антени.



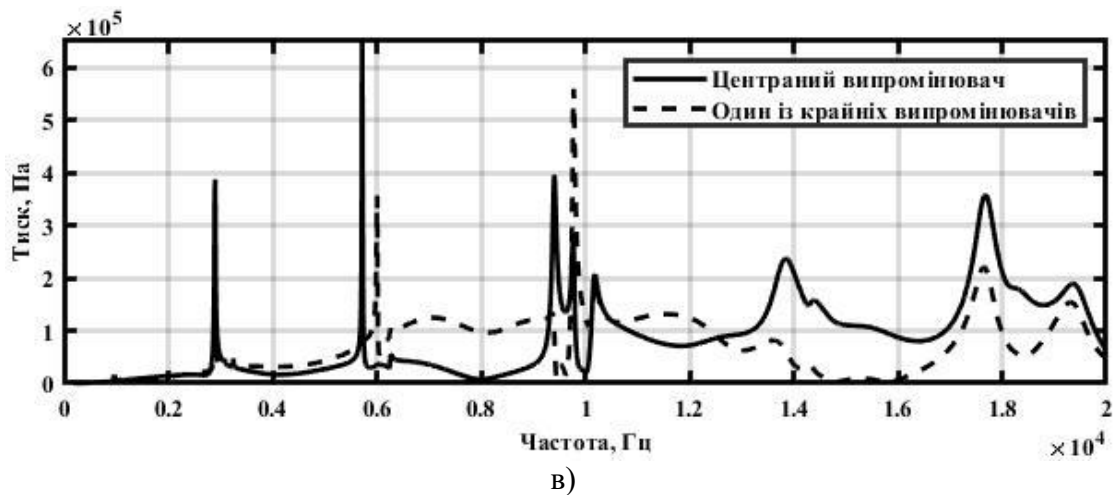


Рис. 3.24 Частотні залежності амплітуд акустичного тиску вакуумованих випромінювачів при секторному випромінненні трьохелементних антен з екранами різних геометричних розмірів  $r_{0N+1} = 3r_0$  (а, б);  $5r_0$  (в)

При цьому особливістю є те, що при всіх розмірах екранів крайні випромінювачі в резонансній області мають більші амплітуди коливальних швидкостей, ніж середні. Це обумовлено тим, що в цій області власні механічні резонанси випромінювачів і суттєвий вплив набуває реакція середовища та обмін акустичною енергією між всіма елементами антени. В цій області акустичні характеристики випромінювачів суттєво відрізняються між собою для різних випромінювачів. Так, амплітуди звукових тисків на поверхнях випромінювачів на одній і тій же частоті можуть відрізнятися в  $(10 \div 30)$  разів, причому при збільшенні екрану ця різниця зменшується (рис. 3.24). Фазові ж характеристики приймають значення, рівні нулю, для різних частот, а її кількість збільшується при збільшенні розмірів екрану (рис. 3.2 і 3.24).

При переході від силової конструкції випромінювачів до компенсованої (рис. 3.24 в) зміна розмірів екранів в антені має ті ж самі наслідки, що і в антенах з силовими конструкціями випромінювачів.

Раніше при виконанні досліджень було встановлено, що результатом появи акустичної взаємодії між елементами кругової антени з екраном є втрата циліндричними випромінювачами у складі антени радіальної симетрії їх акустичного навантаження. Саму ступінь порушення радіальної симетрії цього навантаження визначає в подальшому і якісно, і кількісно ефективність перерозподілу енергії, яка «закачується» у випромінювачі на нульовій моді їх



коливань, між наступними модами. Поява цих мод коливань циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів є закономірним наслідком втрати ними радіальної симетрії акустичного навантаження випромінювачів. Таким чином, хвильова природа цих змін фізичних полів циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів, які виникають при розміщенні їх в кругових циліндричних антенах з екраном, полягає в наступному. При розміщенні циліндричних випромінювачів і акустичного екрану в єдиній конструкції і збудженні випромінювачів радіально симетричним електричним полем між всіма елементами антени відбувається обмін багатократно випроміненими і відбитими від елементів звуковими хвилями. Цей обмін акустичною енергією між елементами антени в процесі її роботи, названий взаємодією елементів по акустичному полю, є фізичною причиною зміни характеру радіаційного навантаження випромінювачів в антені. Величина акустичної взаємодії залежить від відстані між елементами антени. Тому при  $kr_{qs} \rightarrow \infty$  ця взаємодія зникає і радіаційне навантаження випромінювачів в антені стає таким же як у випромінювача при роботі його поза антеною, тобто радіально симетричним. У всіх інших випадках поява акустичної взаємодії в такій конструкції як кругова антена з акустичним екраном та ще й при різних видах випромінення енергії порушує радіальну симетрію акустичного навантаження випромінювачів. Наслідками цього порушення є: поява в механічному полі випромінювачів у складі антени наступних за нульовою мод коливань; схожість рівнів амплітуд нових мод коливань з амплітудою нульової моди; ефективний перерозподіл енергії нульової моди між всіма модами механічного поля; незмінність «закачки» енергії у випромінювачів при вибраному радіально симетричному полі їх електричного збудження тільки на нульовій моді їх механічного поля. В свою чергу зміна механічних полів випромінювачів обумовлює зміну опорів їх електричного навантаження, що призводить до змін параметрів їх електричних полів, залишаючи їх при цьому радіально симетричними.

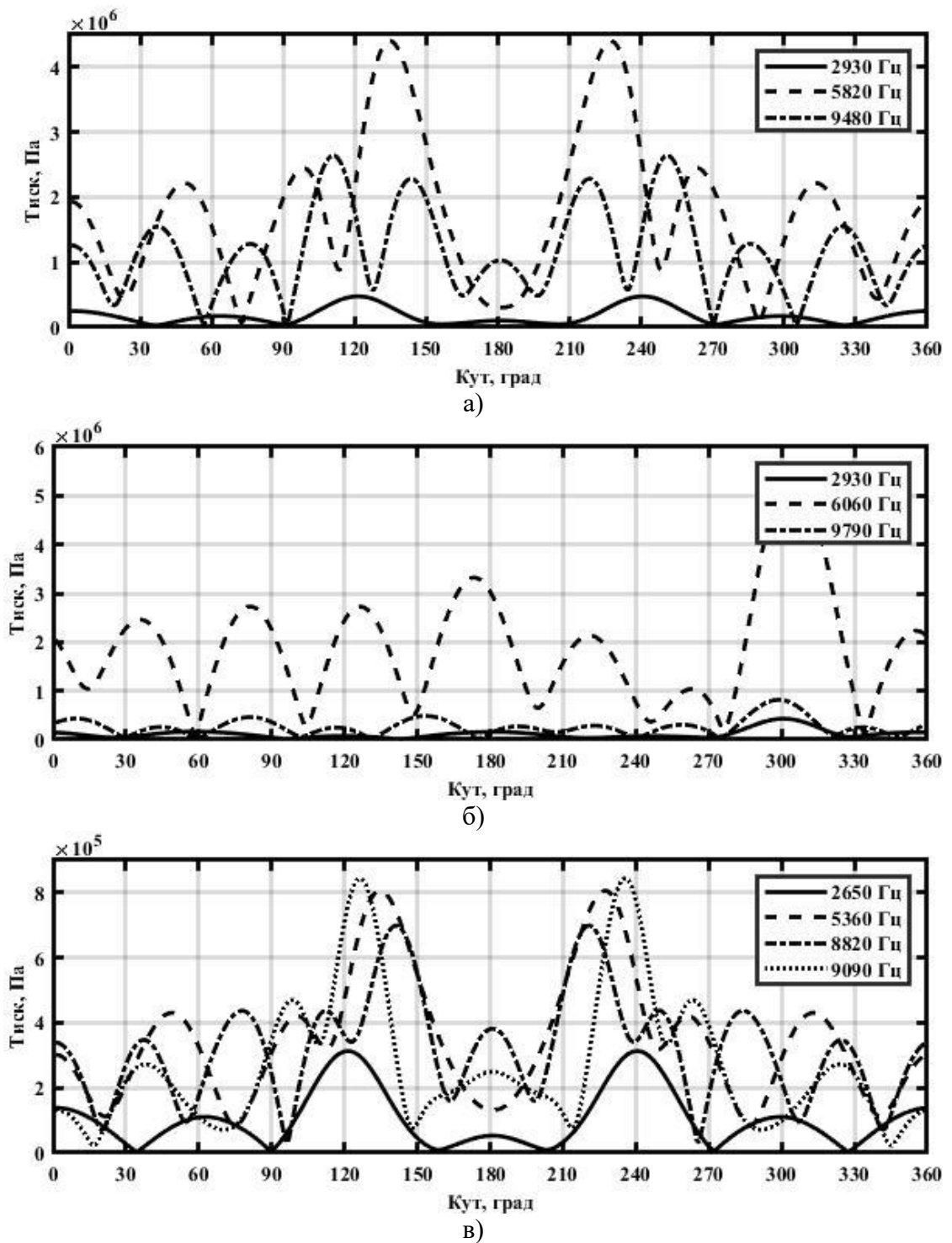


Рис. 3.25 Кутовий розподіл амплітуд акустичного тиску на поверхні заповнених повітрям (а, б) та водою (в) середніх (а, в) та крайніх (б) випромінювачів при секторному випромінненні кругової антени з екраном  $r_{0N+1} = 3r_0$  на різних частотах

Беручи до уваги наведене, визначимо, як впливають на акустичну взаємодію, а, відтак, і на ступінь порушення радіальної симетрії акустичного навантаження випромінювачів зміни розмірів акустичного екрану і відстаней між екраном і випромінювачами.

Аналіз чисельних результатів, наведених на рис. 3.5 і 3.25, свідчить про наявність певного впливу збільшення розмірів екрану на наведені характеристики, але неможливість його визначення як значного.

Ще одним із важливих параметрів конструкцій кругових антен з екраном є кількість випромінювачів у складі антени. Залишаючи незмінними всі інші параметри антени, визначимо, як впливають на акустичні поля їх випромінювачів зміни кількості випромінювачів в них.

Аналіз частотних залежностей амплітуд і фаз акустичного тиску на поверхнях випромінювачів у складі трьохелементної (рис. 3.1 і 3.12) і п'ятиелементної (рис. 3.26) антен при круговому випромінненні звуку свідчить про наступне.

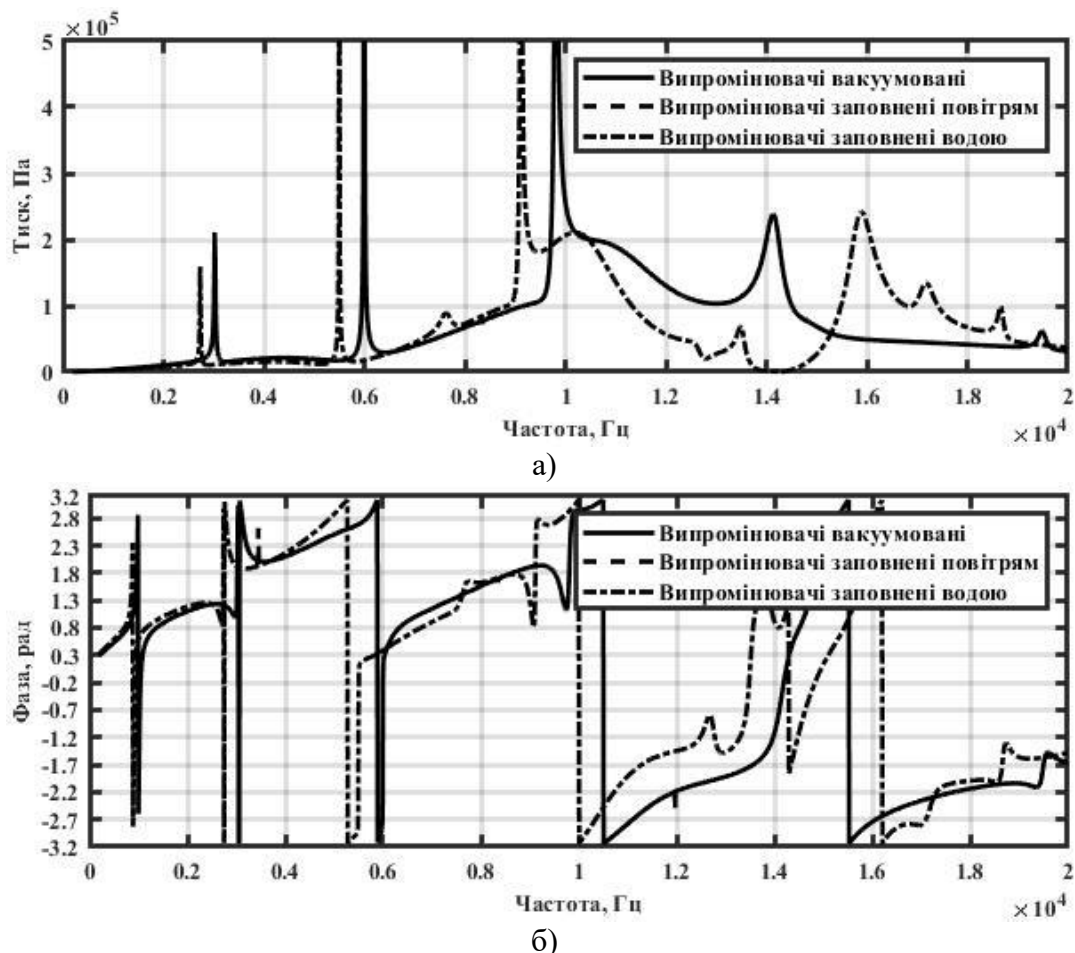
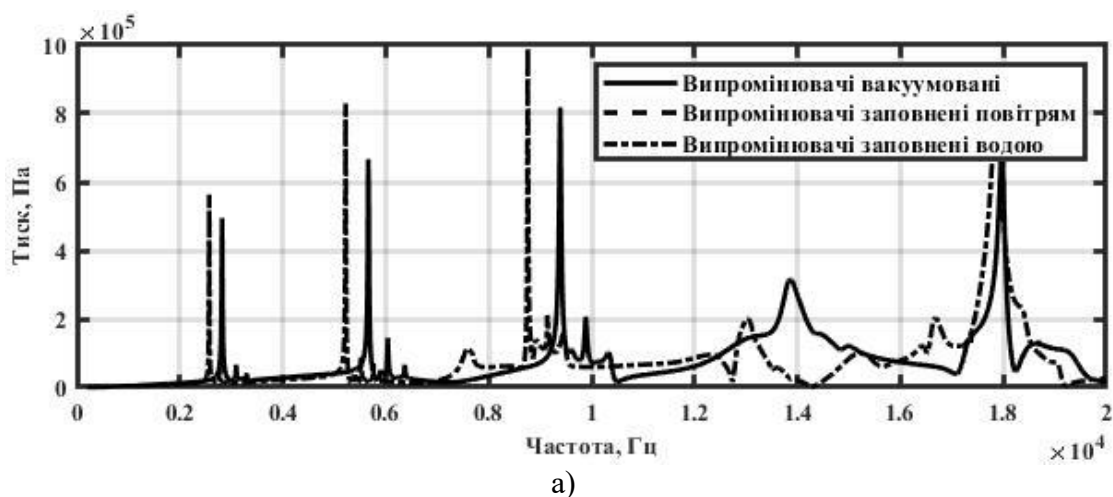
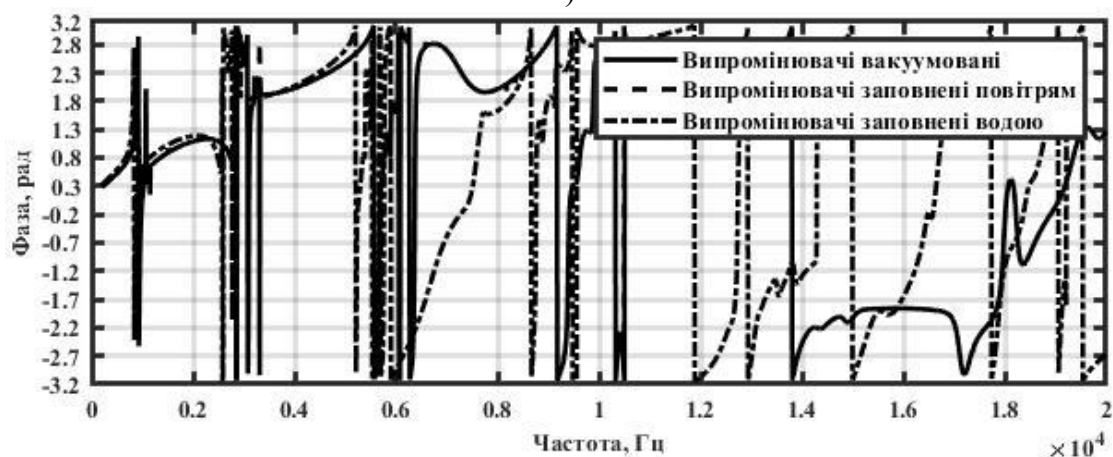


Рис. 3.26 Частотні залежності амплітуд (а) та фаз (б) акустичного тиску силових і компенсованих випромінювачів при круговому випромінненні антени з екраном

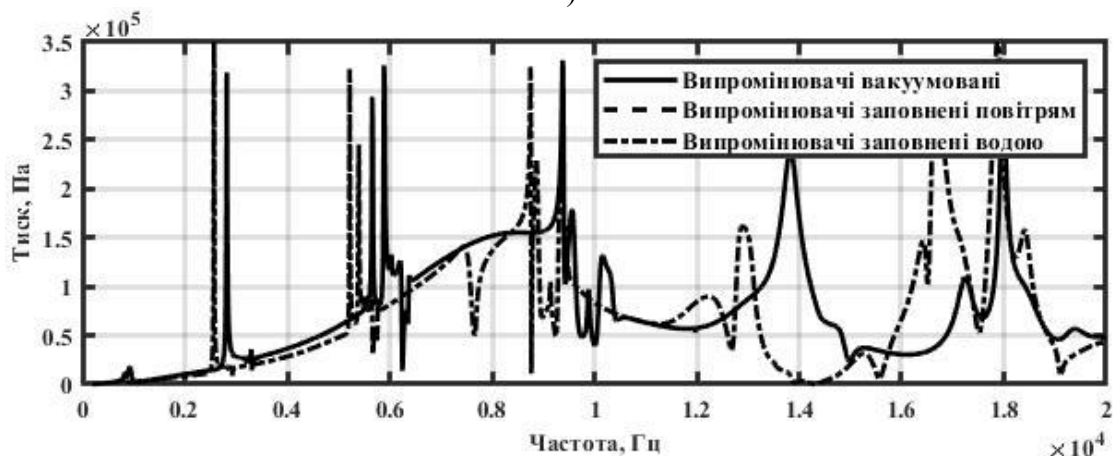
В області низьких частот ( $0 \div 8000$ ) Гц збільшення кількості випромінювачів в антені не обумовлює збільшення кількості власних акустичних резонансів. В той самий час частоти додаткових резонансів в більш багатoelementній антені і в антені з компенсованими випромінювачами розміщуються нижче частот додаткових



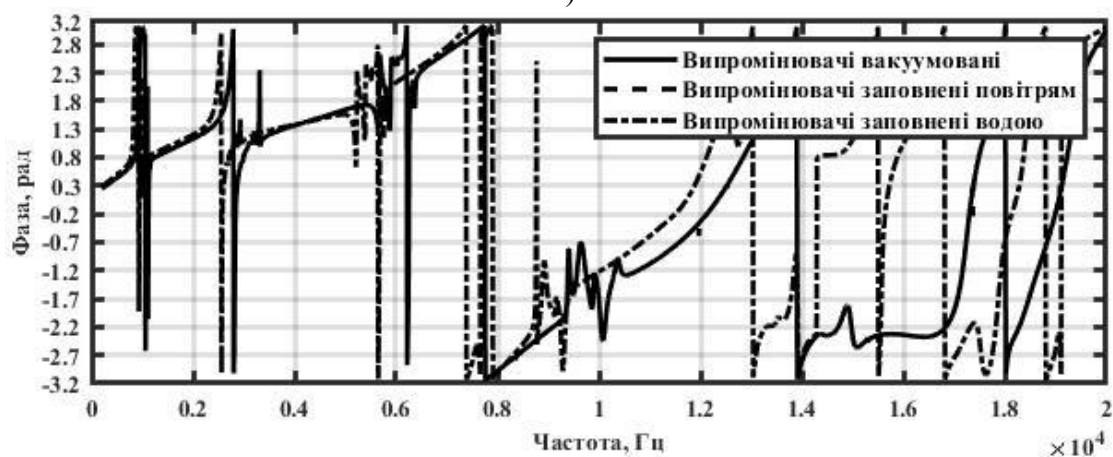
а)



б)



в)



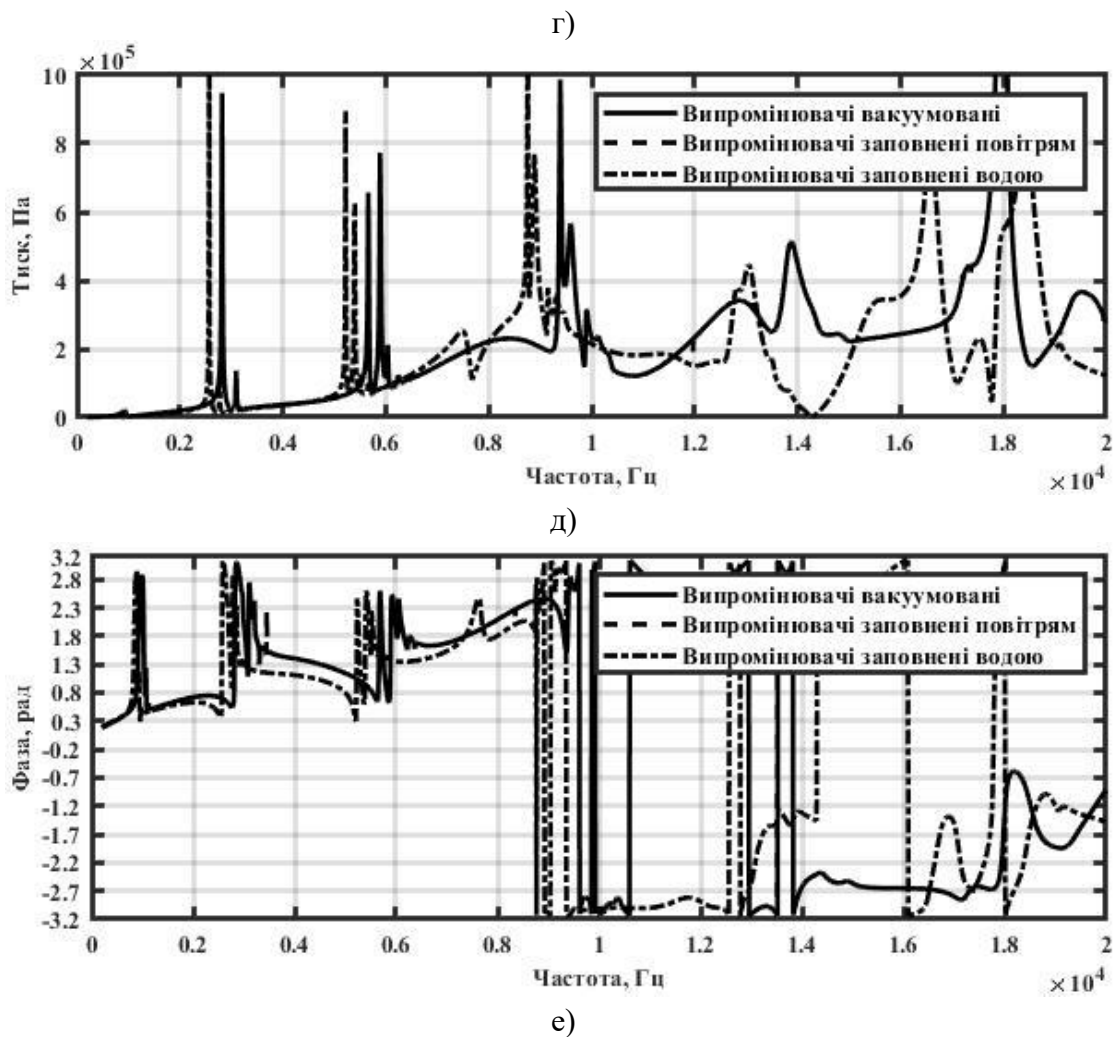


Рис. 3.27 Частотні залежності амплітуд (а, в, д) та фаз (б, г, е) акустичного тиску силових і компенсованих випромінювачів при секторному випромінненні кругових антени з екраном

резонансів в антенах з силовими випромінювачами і з меншою кількістю випромінювачів. Така сама тенденція має місце і в області резонансних частот. В області ж високих частот додаткові резонансні частоти антени з компенсованими випромінювачами знаходяться вище ніж у антен з випромінювачами силової конструкції. У всіх частотних областях амплітуди акустичного тиску на поверхнях випромінювачів збільшуються по мірі збільшення кількості випромінювачів в антенах.

Така сама картина в поведінці частотних залежностей акустичного тиску на поверхні випромінювачів при збільшенні їх кількості в антені спостерігається і при секторному випромінненні звуку (рис. 3.2, 3.13 і 3.27). Дуже цікавими є відмінності в поведінці фазочастотних залежностей випромінювачів при зміні їх місце розташування в секторі кругової антени з екраном (рис. 3.27).

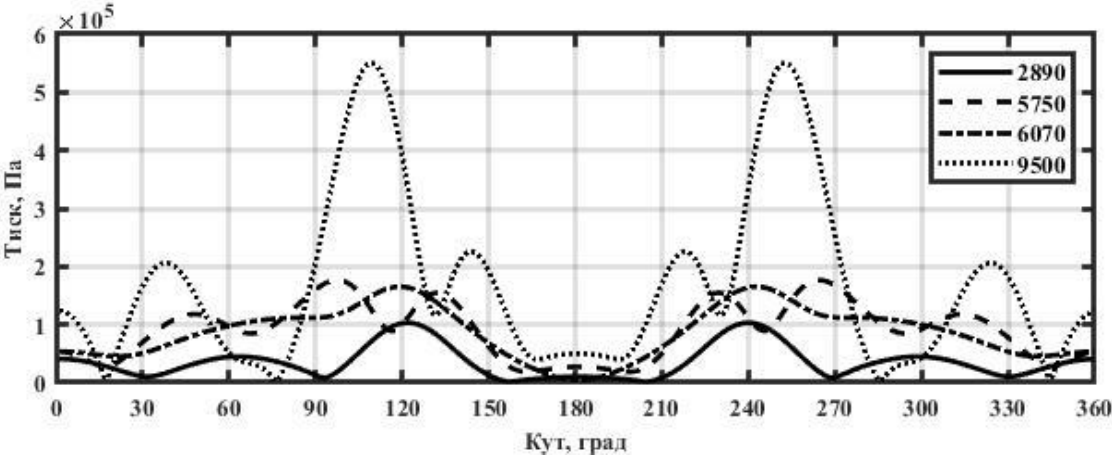
Ці відмінності в цілому полягають в тому, що кількість перетинів фазовими характеристиками осі абсцис в залежності від місця розташування випромінювача в секторі різна для різних частотних областей. Це свідчить про різну багатократність різними випромінювачами випромінюючого сектора кругової антени з екраном змін

характеру повного механічного імпедансу випромінювачів з пружного на інерційний і навпаки. Зауважимо, що частоти, де фазова характеристика перетинає вісь абсцис, є власними частотами системи «випромінювач – екран – сусідні випромінювачі – оточуюче середовище», а їх поява і зміна значень обумовлені акустичною взаємодією елементів в круговій антені з екраном. Виходячи з наведеного вище, аналіз кривих рис. 3.2, 3.13 і 3.27 показує, що не всі викиди амплітуд акустичного тиску в амплітудно-частотних залежностях випромінювачів є резонансними. Найбільшу кількість нових власних частот і найбільше розширення їх в область низьких частот мають центральні випромінювачі (рис. 3.27 б). У випромінювачів, які знаходяться між крайніми і центральним (рис. 3.27 в, г) , акустична взаємодія формує меншу кількість нових резонансів в низькочастотній області порівняно із центральним випромінювачем і мінімізує кількість власних частот в резонансній області. Крайні ж випромінювачі сектора взагалі не мають власних резонансів в низькочастотній області (рис. 3.27 д, є). В той же час кількість резонансних частот в резонансній області ( $8 \div 14$ ) кГц у них навіть більша ніж у центрального випромінювача. В високочастотній області найбільшу кількість власних частот акустична взаємодія елементів в круговій антені з екраном формує при секторному випроміненні у випромінювачів, які розміщені поряд із центральним.

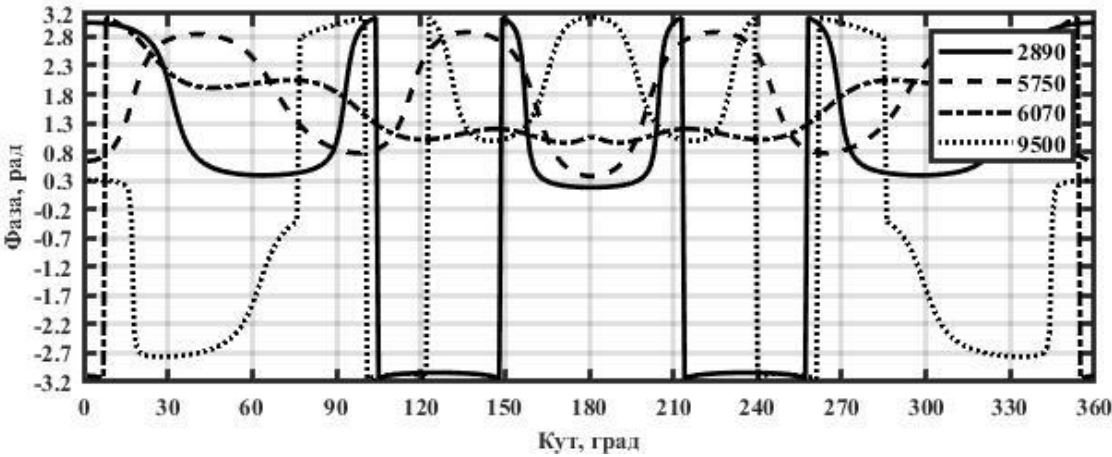
Встановлені вище закономірності в залежностях амплітуд і фаз акустичного тиску на поверхнях випромінювачів п'ятиелементної кругової антени з екраном при секторному випроміненні звуку є результатом тих змін, які викликає акустична взаємодія елементів антени в поведінці кутового розподілу амплітуд і фаз цього поля по поверхням випромінювачів. Графіки рис. 3.28 демонструють ці зміни для кругових антен з екраном, які утворені із випромінювачів силової конструкції, заповнених повітрям, при секторному випроміненні звуку. Аналіз їх свідчить про наступне. По-перше, при розміщенні 4 циліндричних випромінювачів у складі кругової антени з екраном завдяки взаємодії їх по акустичному полю всі вони втрачають однорідність кутових розподілів амплітуд і фаз акустичного тиску на своїй поверхні. По-друге, в кількісному відношенні ступінь неоднорідності кутового розподілу амплітуд акустичного тиску зменшується по мірі наближення випромінювача від центру сектора кругової антени (рис. 3.28 а) до його країв (рис. 3.28 д). По-третє, ступінь неоднорідності кутового розподілу амплітуд тиску збільшується при збільшенні робочої частоти антени. І, нарешті, по-четверте, найменші кутові зміни фази акустичного тиску на поверхні випромінювача мають крайні випромінювачі в секторі антени.

Заміна випромінювачів силової конструкції в круговій антені з екраном при секторному випроміненні звуку (рис. 3.29) мало змінюють закономірності, встановлені для антен, які утворені із силових випромінювачів. Зміни торкаються

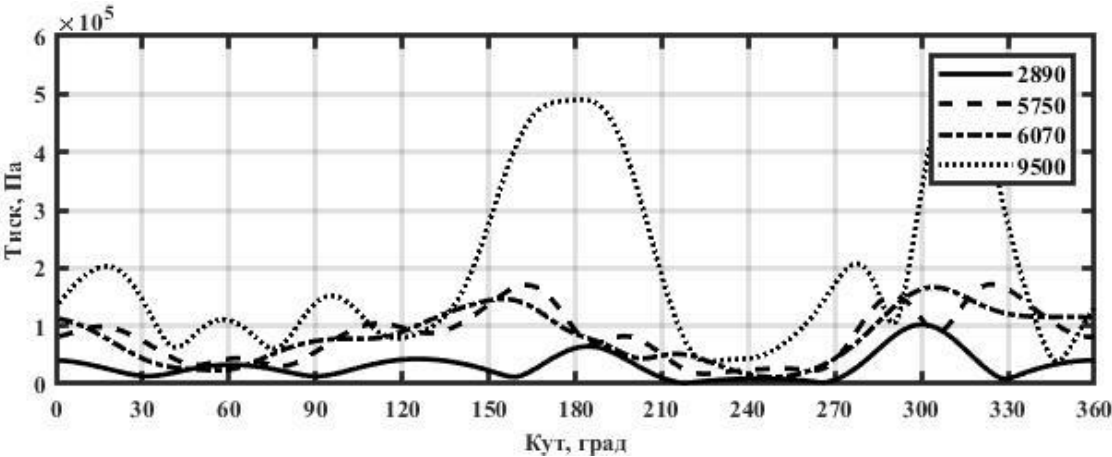
крайніх випромінювачів сектора і полягають в збільшенні ступеню відходу від радіальної симетрії кутового розподілу амплітуд акустичного тиску.



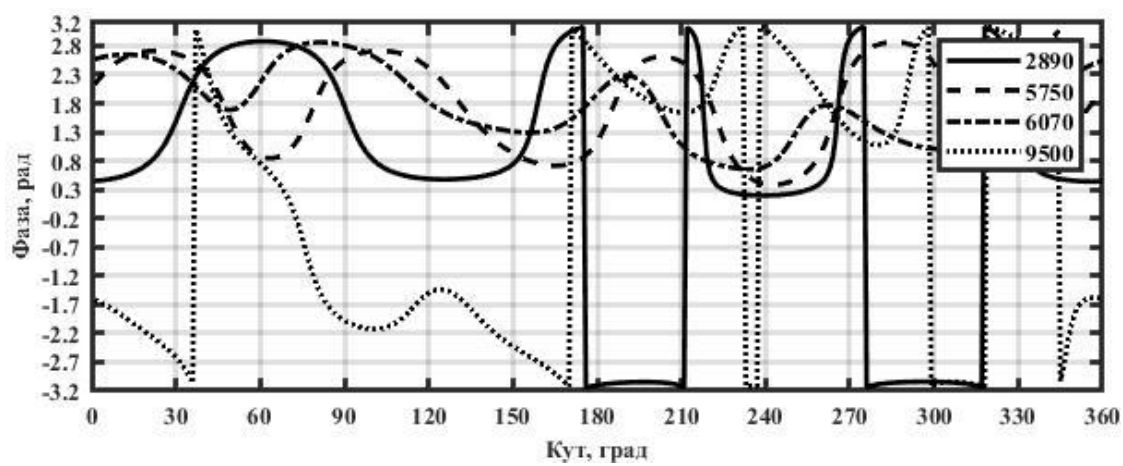
а)



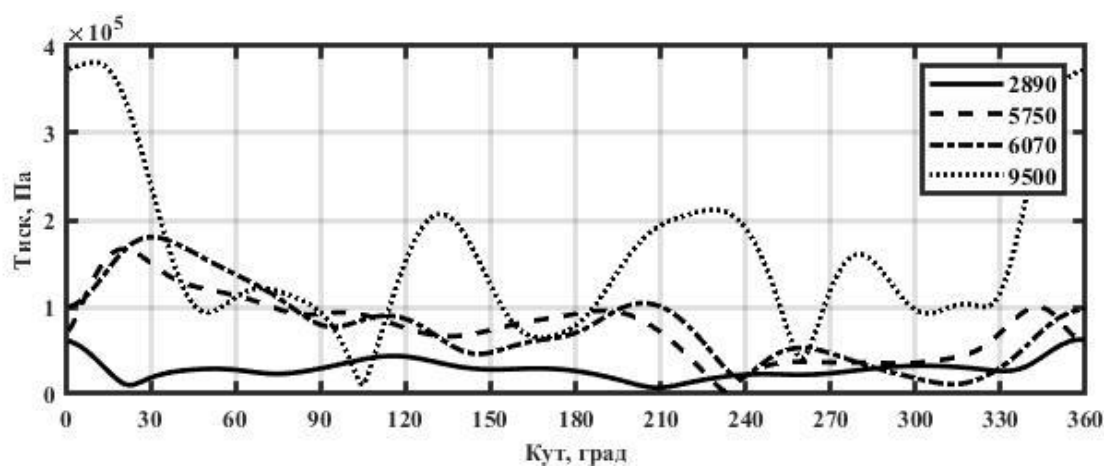
б)



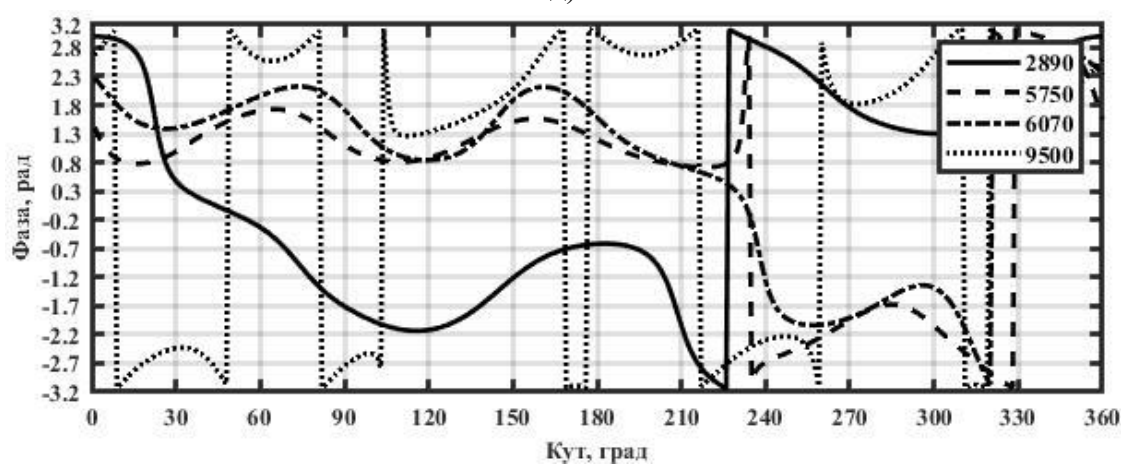
в)



г)



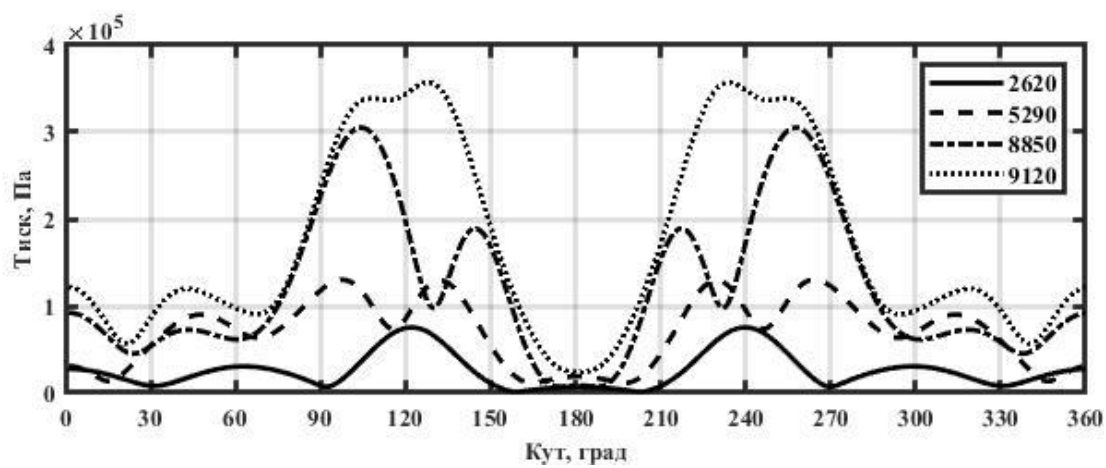
д)



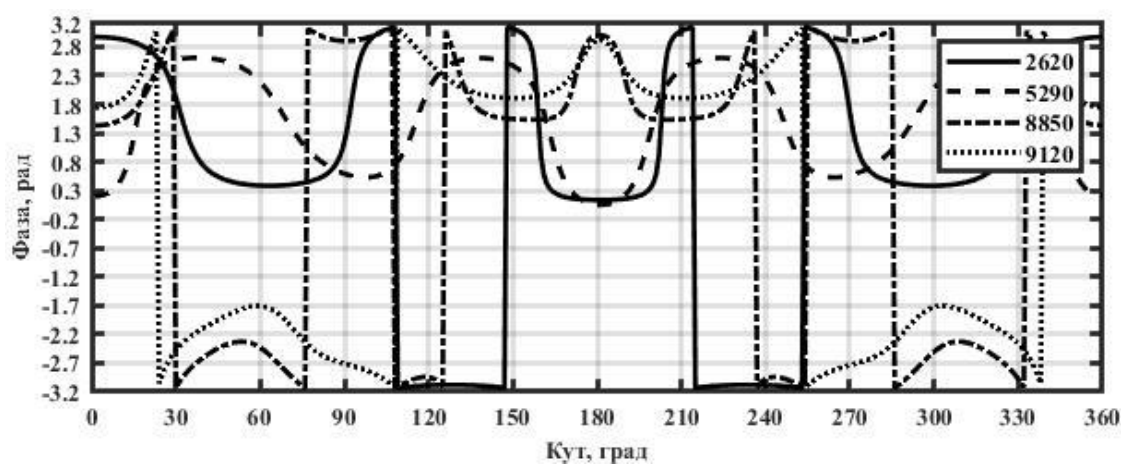
е)

Рис. 3.28 Кутові залежності амплітуд (а, в, д) та фаз (б, г, д) третього (а, б), другого (в, г) і першого (д, е) випромінювачів силової конструкції у складі п'ятиелементної антени з екраном

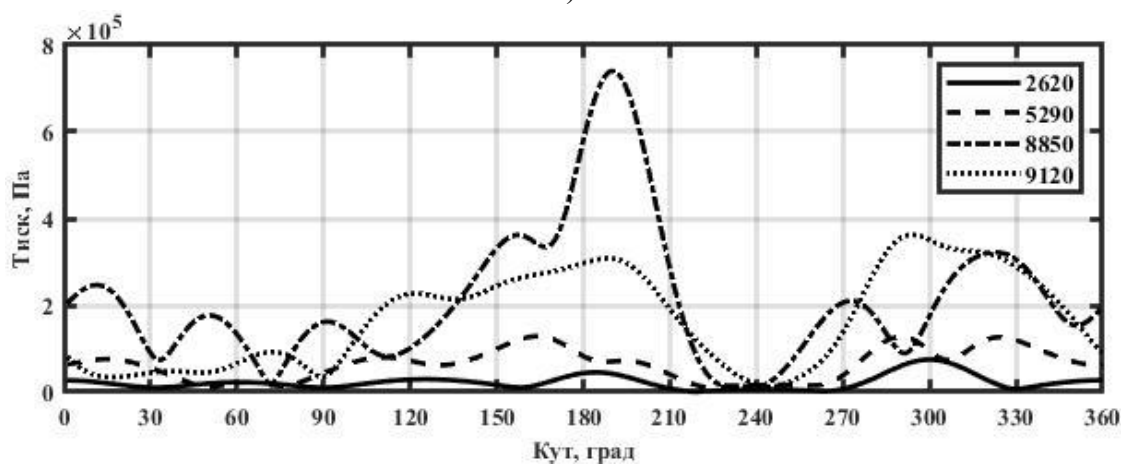




а)



б)



в)

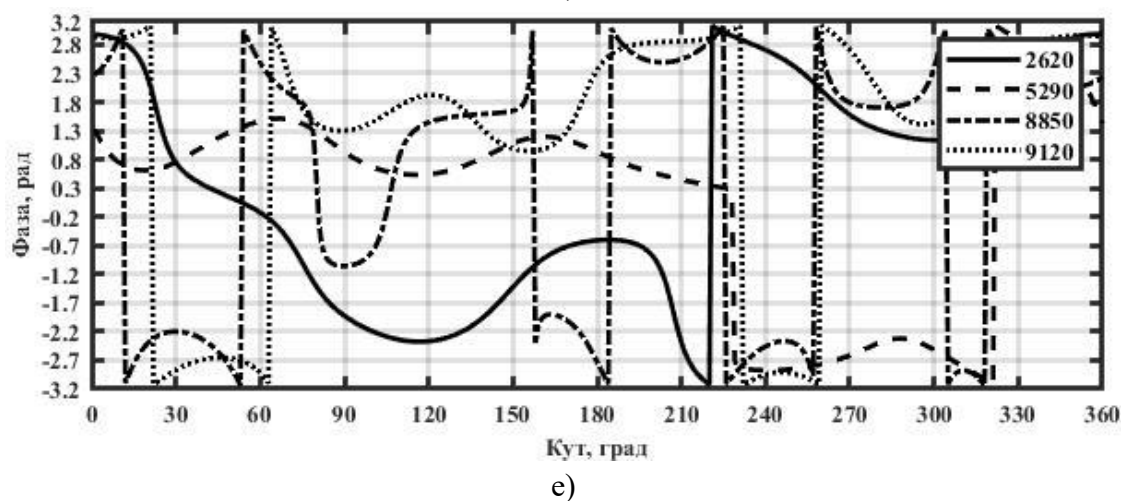
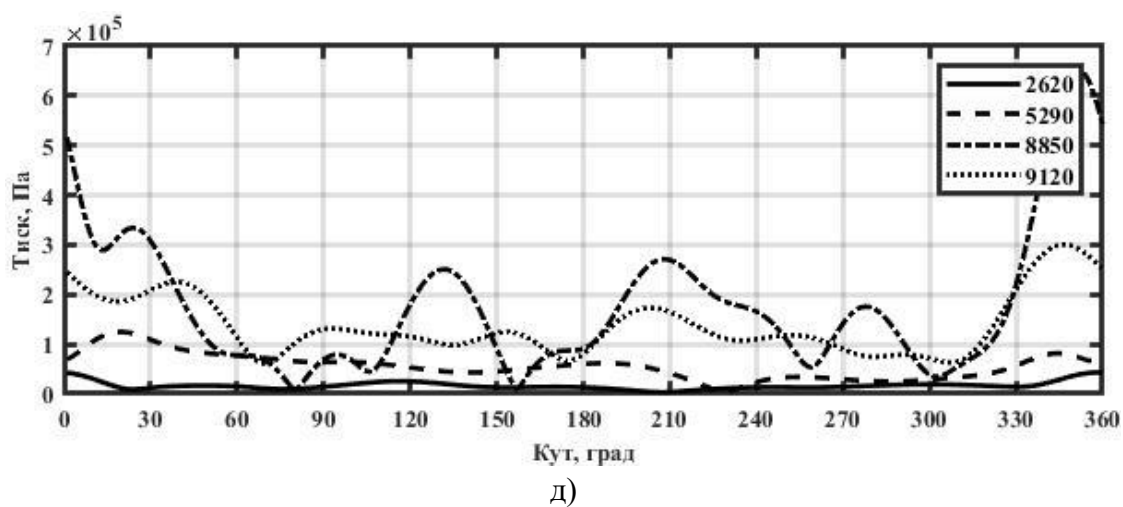
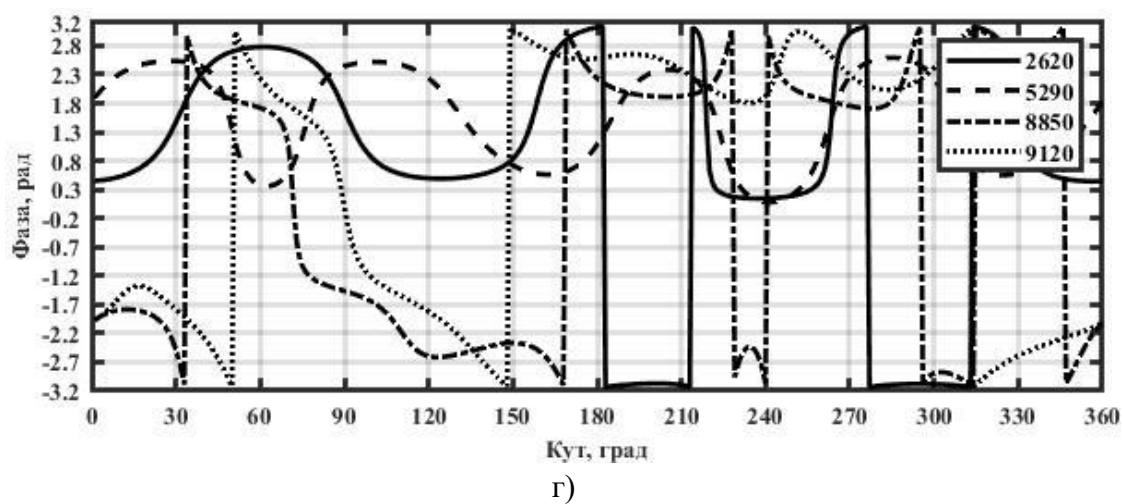
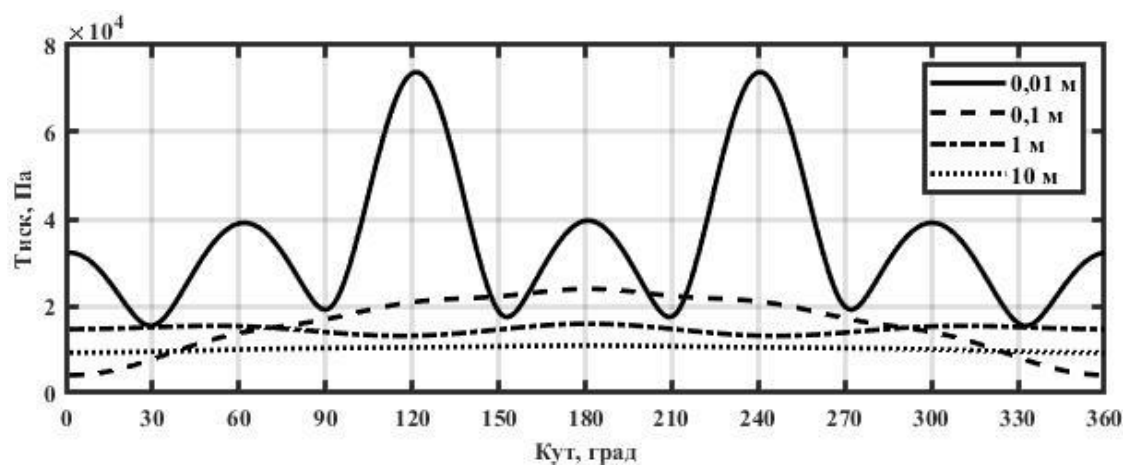
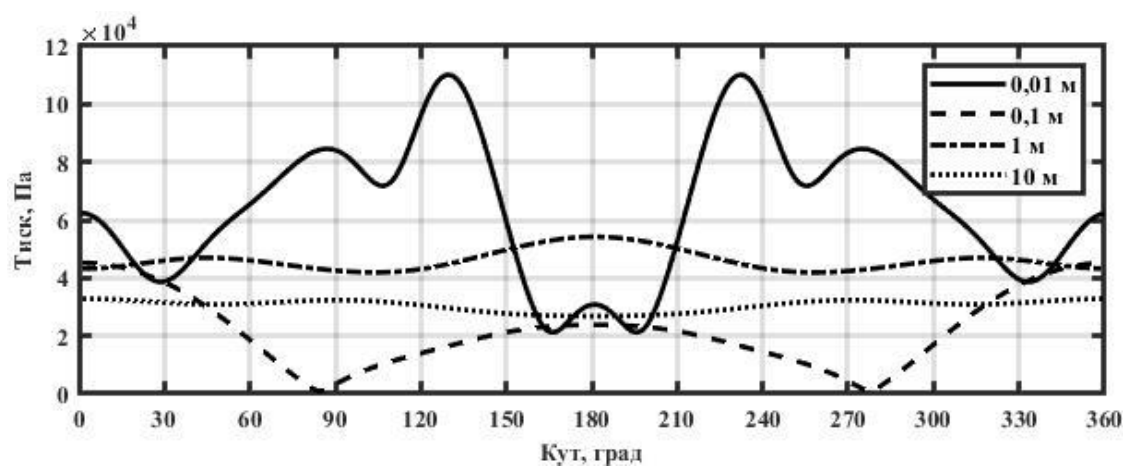


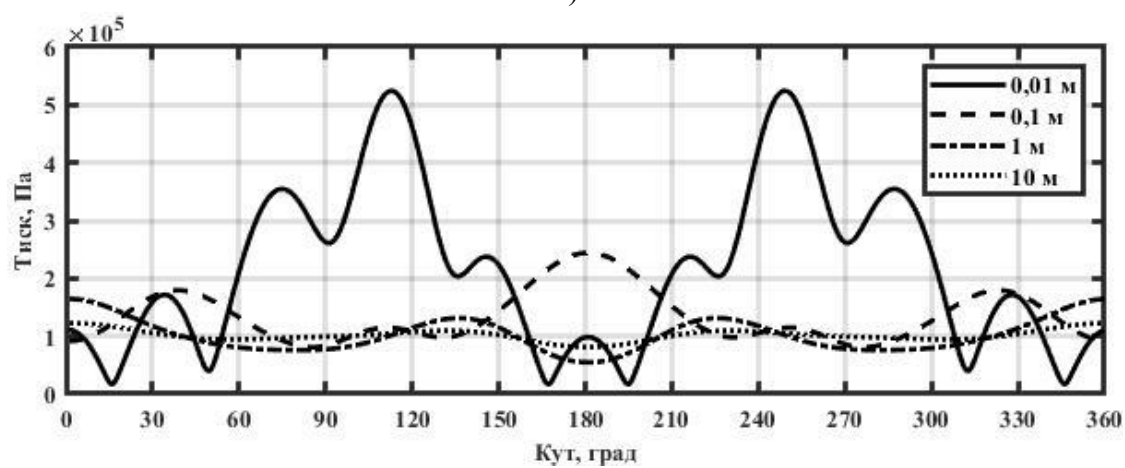
Рис. 3.29 Кутові залежності амплітуд (а, в, д) і фаз (б, г, е) третього (а, б), другого (в, г) і першого (д, е) випромінювачів компенсованої конструкції у складі п'ятиелементної антени з екраном



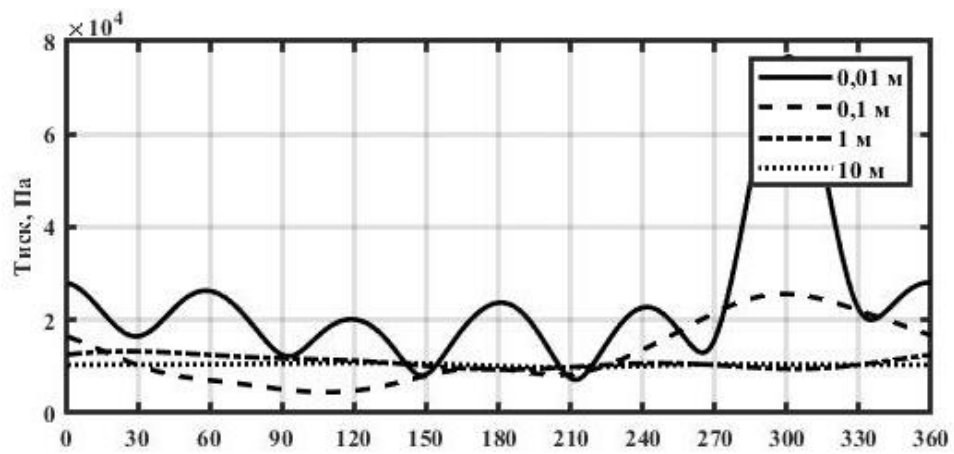
а)



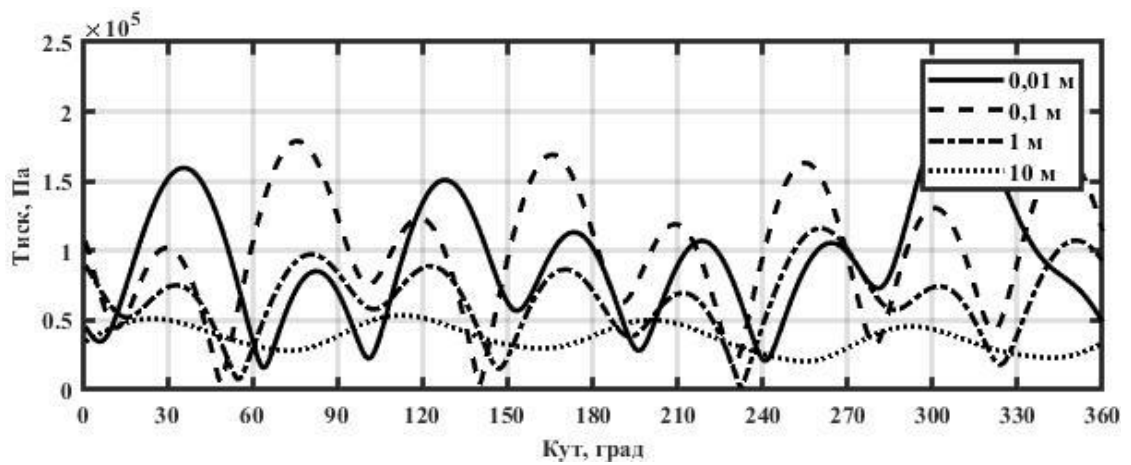
б)



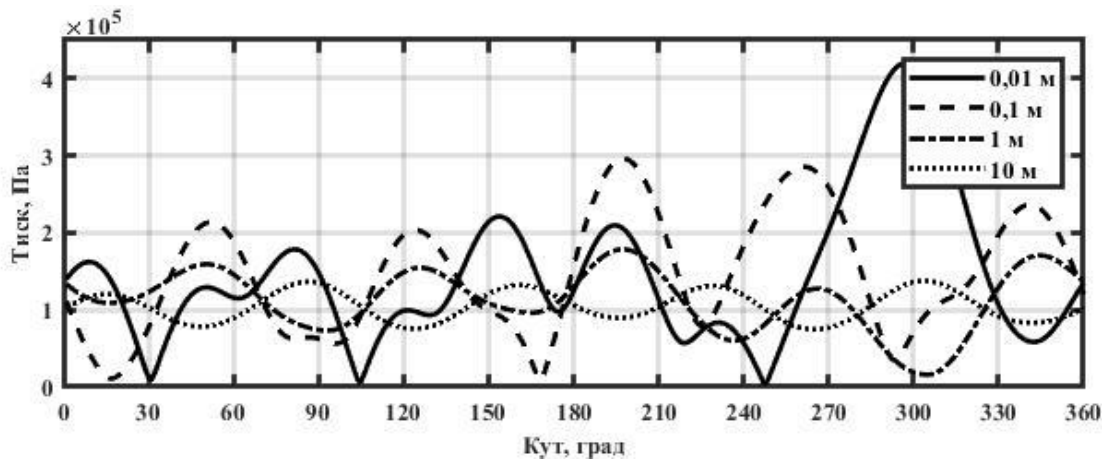
в)



г)



д)



е)

Рисю 3.30 Кутові залежності амплітуд акустичного тиску центрального (а, б, в) і крайніх (г, д, е) випромінювачів кругової антени з екраном при секторному випромінненні звуку на різних частотах для різних відстаней між елементами антени

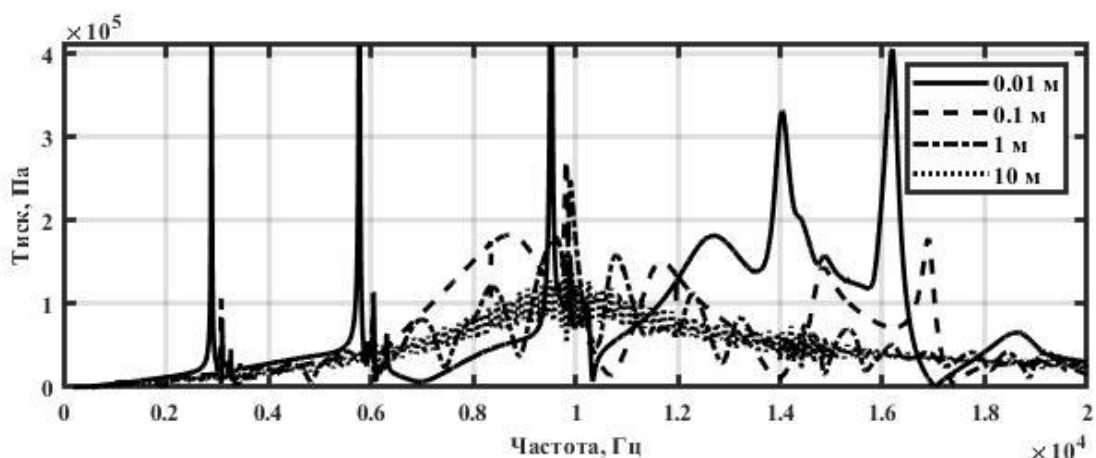
Ще однією із характеристик конструкцій кругових антен з екраном є її розміри, які включають відстані між випромінювачами і між випромінювачами і екраном. До цього часу досліджувались конструкції, в яких ці відстані є мінімальними і близькими до реальних конструкцій. Природно, що для таких відстаней всі види

акустичної взаємодії є максимальними. А їх вплив на формування фізичних полів є найбільшим. Раніше було показано як математично визначається він. Дослідимо тепер, як в залежності від значень відстаней між елементами кругової антени змінюється ступінь порушення радіальної симетрії випромінювачів у складі кругової антени. Як було встановлено раніше, саме вона є кількісною характеристикою впливу акустичної взаємодії на фізичні поля антени. Аналіз кутових залежностей, наведених на рис 3.30, свідчить про наступне.

По-перше, вплив акустичної взаємодії на порушення радіальної симетрії акустичного навантаження випромінювачів у складі кругової антени залежить від відстані між елементами антени, її робочої частоти, місця розміщення випромінювача в антені і характеру організації випромінювання. При однакових відстанях і однаковому розміщенні в антені збільшення значень робочої частоти супроводжується збільшенням нерівномірності кутового розподілу амплітуд тиску по поверхні випромінювачі антени. Зміна місця розташування випромінювача в антені при секторному випромінюванні з центрального (рис. 3.30 а, б, в) до крайніх (рис. 3.30 г, д, є) обумовлює більші порушення радіальної симетрії акустичного навантаження. Але найбільший вплив на акустичну взаємодію здійснює хвильова відстань між елементами антени. При цьому при менших  $kl$  (рис. 3.30 а, г) радіальна симетрія акустичного навантаження настає раніше, ніж при більших  $kl$  (рис. 3.30 в, є). Дуже цікавими є зміни в частотних залежностях акустичного тиску в цілому (рис. 3.31 а) і складових акустичного тиску (рис. 3.31 б – г), даючи модам коливань механічних полів, на поверхнях випромінювачів антени. Аналіз наведених кривих свідчить про наступне. По-перше, при збільшенні відстані між елементами антени рівень всіх власних акустичних резонансів (рис. 3.31 а) починає стрімко зменшуватися. В кінцевому результаті частотні залежності амплітуд акустичного тиску випромінювачів у складі кругової антени з екраном стають тотожними з аналогічними ж залежностями одиночного випромінювача. По-друге, при збільшенні відстані між елементами антени кількість додаткових власних резонансних частот (рис 3.31 б) починає зменшуватися, а наявність кількох елементів у складі кругової антени проявляється в появі в частотній залежності

амплітуд бахром. Ця бахрома являє собою чисельні коливання малої амплітуди, усереднена частотна залежність яких співпадає з амплітудно-частотною залежністю тиску одиночного випромінювача. По-третє, амплітуда коливань тиску в бахромі є максимальною в області власного резонансу п'єзокерамічних оболонок випромінювачів антени і зменшується по мірі віддалення від цієї частоти як в бік низьких частот, так і в бік високих. Фізично поява бахромі відображує наявність багатократного обміну між елементами кругової антени з екраном випроміненими і відбитими звуковими хвилями.

Цікавим є аналіз процесів зміни перерозподілу акустичної енергії між складовими акустичного тиску, які відповідають різним модам коливань механічних полів випромінювачів досліджуваної антени (рис. 3.32). При цьому слід відзначити два фізичні фактори. Перший полягає в тому, що при збільшенні відстаней між елементами акустичні тиски складових, які відповідають наступним за нульовою модам коливань, поступово зменшуються. В той самий час амплітуда тиску на нульовій моді випромінювачів у складі кругової антени з екраном стає тотожною аналогічній залежності одиночного випромінювача. По-друге, при збільшенні відстані між елементами антени кількість додаткових власних резонансних частот (рис. 3.31 б) починає зменшуватися, а наявність кількох елементів у складі кругової антени проявляється в появі в частотній залежності амплітуд бахром.



а)

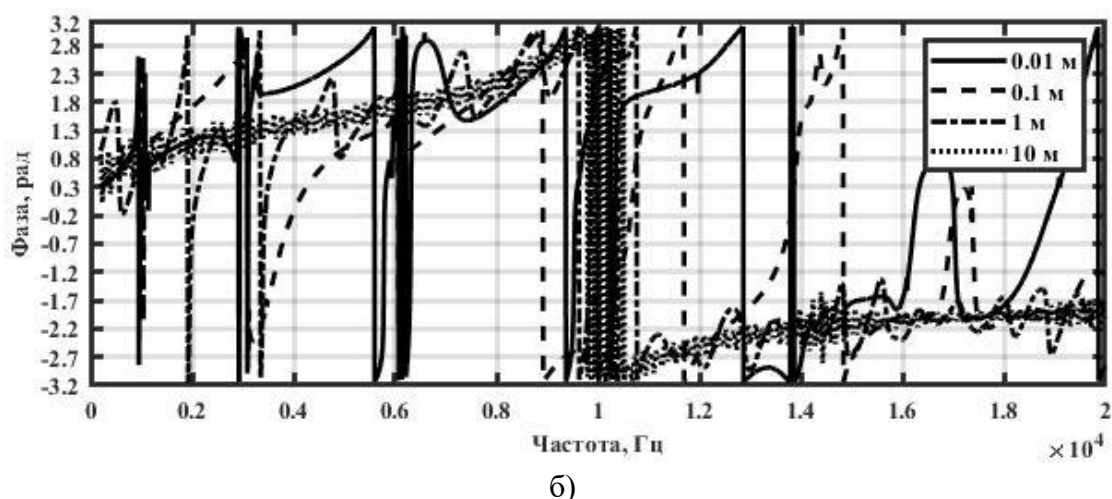
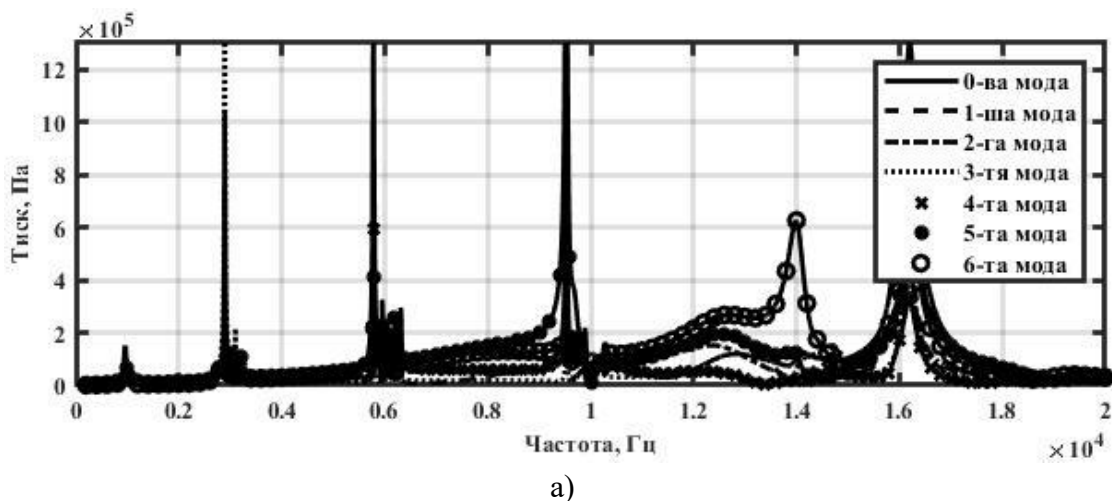
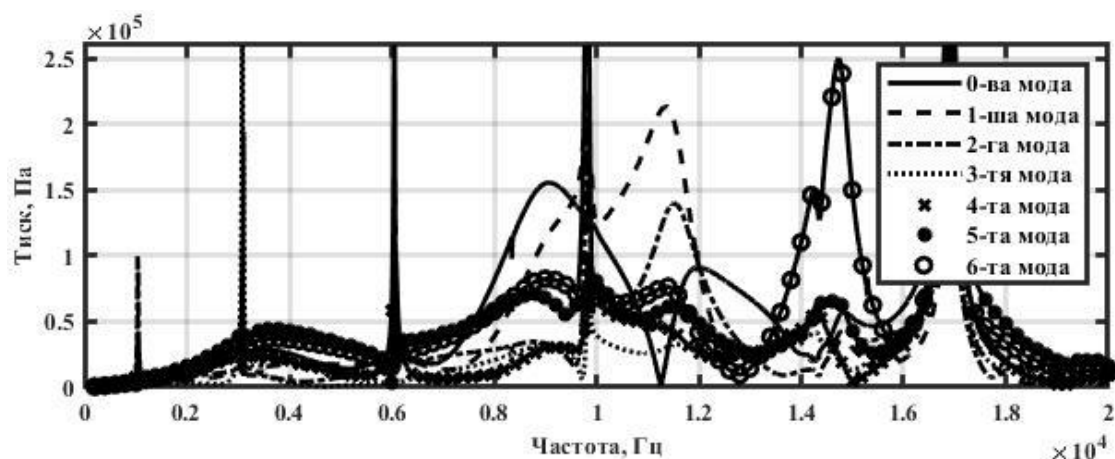


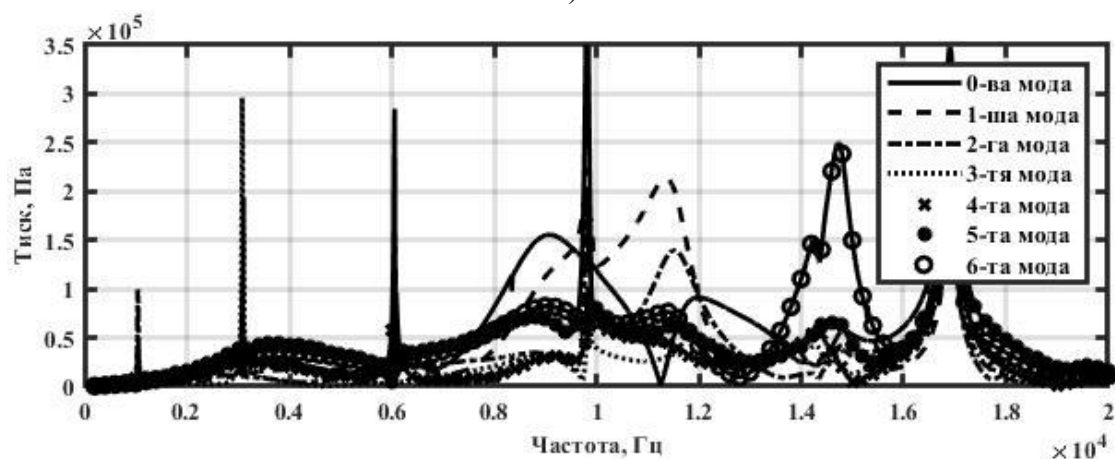
Рис. 3.31 Частотні залежності амплітуд (а) та фаз (б) акустичного тиску центрального випромінювача при секторному випромінненні кругової антени з екраном при різних відстанях між елементами антени : 0,01 м; 0,1 м; 1 м; 10 м.

Ця бахрома являє собою чисельні коливання малої амплітуди, усереднена частотна залежність яких співпадає з амплітудно-частотною залежністю тиску одиночного випромінювача. По-третє, амплітуди коливань тиску в бахромі є максимальною в області власного резонансу п'єзокерамічних оболонок випромінювачів антени і зменшується по мірі віддалення від цієї частоти як в бік низьких частот, так і в бік високих. Фізично поява бахрови відображує наявність багатократного обміну між елементами кругової антени з екраном випроміненими і відбитими звуковими хвилями.

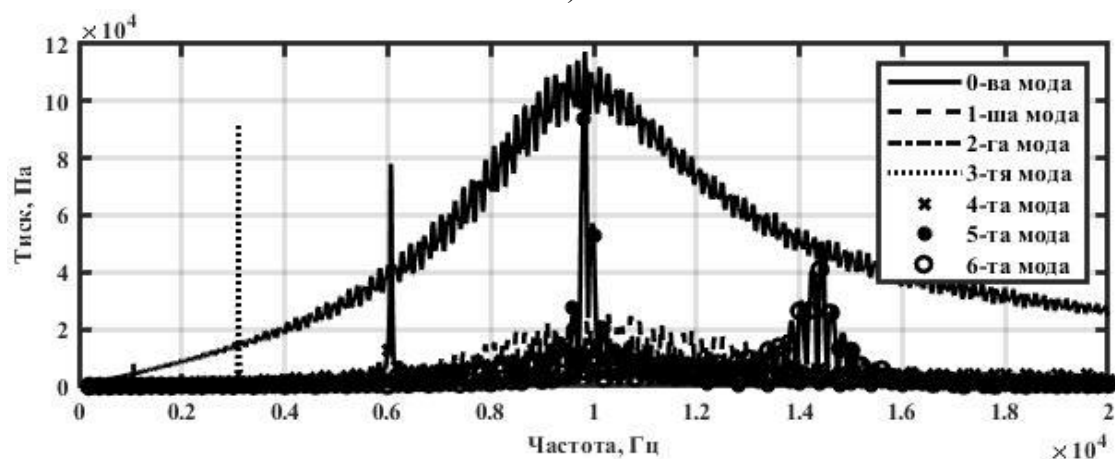




б)



в)



г)

Рис. 3.32 Частотні залежності амплітуд складових акустичного тиску центральних випромінювачів при секторному випромінненні кругових антен з екраном при різних відстанях між елементами антени: 0,01 м (а); 0,1 м (б), 1 м (в); 10 м (г).

Цікавим є аналіз процесів зміни перерозподілу акустичної енергії між складовими акустичного тиску, які відповідають різним модам коливань механічних полів випромінювачів досліджуваної антени, при зміні відстаней між елементами антени (рис. 3.32). При цьому слід відзначити два фізичні фактори. Перший полягає в тому, що при збільшенні відстаней між елементами акустичні тиски складових, які відповідають наступним за нульову модам коливань, поступово зменшуються. В той



самий час амплітуда тиску нульової моди стає визначальною. Другий фактор свідчить про те, що бахрома на частотних залежностях амплітуд акустичного тиску випромінювачів у складі антени обумовлена випроміненням і перевідбиттям звукових хвиль тільки у нульової моди їх коливань (рис. 3.32 г).

Аналіз частотних залежностей амплітуд і фаз акустичних тисків, які створюються іншими випромінювачами кругової антени з екраном, свідчить про такі ж закономірності їх поведінки, як і встановлені для центрального випромінювача при секторному випроміненні антени.

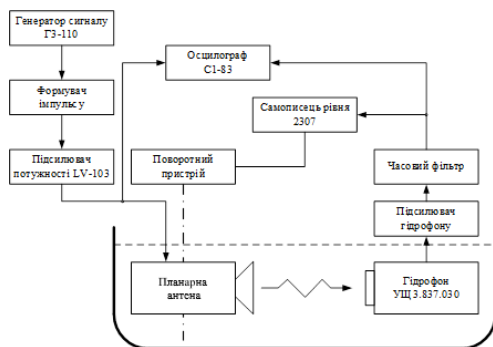
### **3.6 Експериментальні дослідження акустичних полів кругових циліндричних антен з екраном, що утворені із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів.**

Для перевірки відповідності прийнятих в роботі припущень та підходів, які використовувалися для вирішення сформульованих в ході роботи задач, реальним особливостям кругових циліндричних антен з екраном були виконані експериментальні дослідження акустичних полів та проведено співставлення їх із розрахованими для такого типу антени даними. В якості досліджуваної антени виступала трьох елементна секторна акустична антена, що складається із двох циліндричних випромінювачів та акустичного м'якого екрану (рис. 1), випромінювачі у складі антени зведені в сектор  $60^0$ , вони представляють собою циліндричні п'єзокерамічні випромінювачі із окружною поляризацією, склад матеріалу активного елементу – ЦТБС-3; конструкція – силова; кількість призм у складі кільця –  $N=30$ ; серединний діаметр – 64,5 мм; товщина кільця – 5 мм; висота випромінювача – 265 мм; відстань між поверхнями елементів в антені – 5 мм; напруга електричного збудження – 200 В; досліджувані частоти, 8, 16, 20 кГц. Акустичний екран м'якого типу виконаний у вигляді циліндру з такими ж розмірами, як і випромінювачі. Матеріал екрану – звуковідбиваюча гума марки 51-1415.

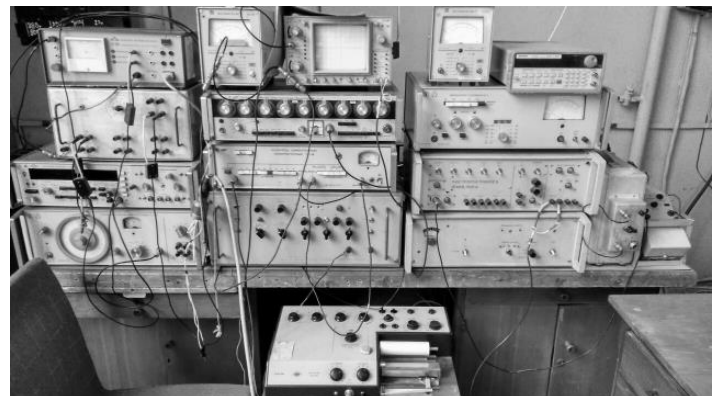


Рис. 3.33 Експериментальний зразок кругової циліндричної антени з екраном і секторним випромінюванням

В якості досліджуваного параметра акустичного поля було обрано нормовану кутову залежність акустичного тиску в дальній зоні випромінювача.



а)



б)

Рис. 3.34. Схема вимірювального стенду (а) та його вигляд (б)

Вимірювання проводились в ДП «КНДІ гідроприладів» у заглушеному вимірювальному басейні у відповідності до вимог, регламентованих ОСТ5.8361-86. Кількість незалежних реалізацій вимірювань була прийнята 7, що забезпечувало – середньоквадратичну похибку вимірювань кутових залежностей 0,08 при довірчій вірогідності 0,95.

Схема побудови вимірювального стенду (а) і його вигляд (б) наведені на рис.3.34.

Результати вимірювань (крива 1) і розрахункові дані (крива 2) діаграм направленості кругової антени з екраном і секторним випромінюванням представлені на рис.3.35.

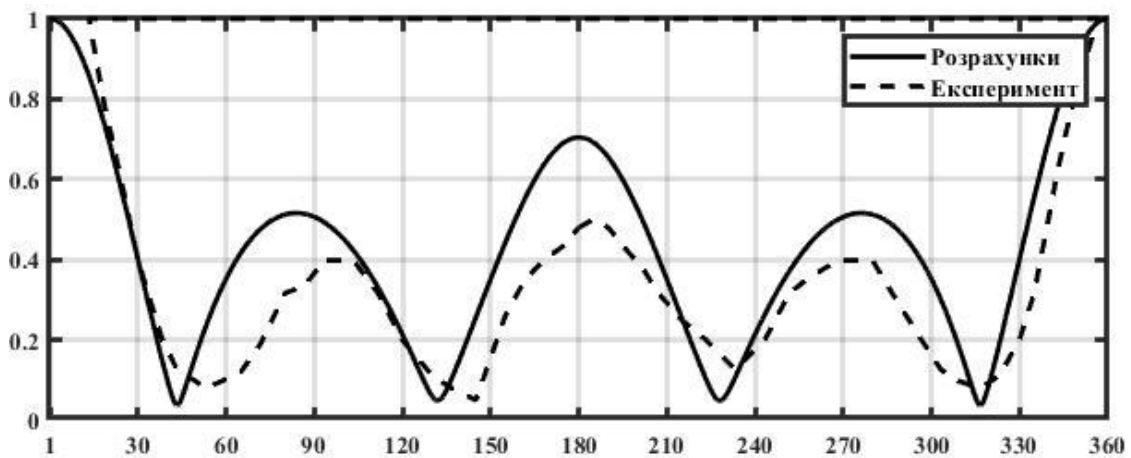


Рис.3.35

Співставлення наведених кривих свідчить про те, що розроблене в роботі аналітичне забезпечення проектування кругових антенних решіток з екраном, які утворені із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів, враховує фізичні особливості реальних антен такого типу.

### Висновки до розділу 3

Методом чисельного експерименту на основі отриманих в розділі 1 аналітичних співвідношень та систематизованого їх аналізу визначені закономірності поведінки ряду локальних характеристик акустичних полів антен та їх випромінювання в залежності від особливостей виконання їх конструкцій. До них відносяться: тип виконання конструкції випромінювачів – силова чи компенсована; вид речовини, що заповнює внутрішні порожнини випромінювачів; склад п'єзокераміки випромінювачів та характер її поляризації; геометричні розміри антени та її елементів, кількість випромінювачів в антені; характер організації випромінювачів сигналів антеною.

Встановлено, що основний вплив на формування акустичних полів круговими антенами з екраном здійснюють акустичні взаємодії між всіма елементами антени, обумовлені багатократним обміном випроміненими та відбитими звуковими хвилями. В кількісному відношенні рівень акустичної взаємодії визначається

хвильовими відстанями між елементами антен і обнуляється при їх великих значеннях.

Встановлено фізичний алгоритм впливу акустичних взаємодій елементів кругових антен на формування фізичних полів їх випромінювачів. Показано, що саме акустичні взаємодії елементів в антені є фізичною причиною порушення радіальної симетрії акустичного навантаження одиночних циліндричних випромінювачів при розміщенні їх в антені. В кількісному відношенні ступінь порушення визначається рівнем акустичної взаємодії і зникає при зникненні акустичної взаємодії.

При радіально симетричному електричному навантаженні, яке має місце в досліджуваній антені, це обумовлює появу в механічних полях випромінювачів антени наступних за нульовою мод коливань. В свою чергу такі зміни механічних полів є причиною появи нових складових акустичного тиску, які генеруються цими додатковими модами механічних коливань.

Встановлено, що поява в акустичних полях випромінювачів нових складових обумовлює появу ряду нових властивостей кругових антен з екраном. До них відносяться: розширення спектру власних резонансних частот випромінювачів; збагачення цього спектру в області низьких частот при незмінності розмірів антени і випромінювачів; визначення мод коливань, які генерують ці нові власні акустичні резонанси; визначення значень цих частот та рівні їх акустичних тисків в залежності від геометричних та фізичних параметрів антен і випромінювачів та виду випромінювання антени.

## **РОЗДІЛ 4. ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ КРУГОВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ГІДРОАКУСТИЧНИХ АНТЕН З ЕКРАНОМ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД КОНСТРУКТИВНОГО ВИКОНАННЯ АНТЕН ТА ЇХ ЕЛЕМЕНТІВ.**

### **4.1 Параметри електричних полів, що досліджуються**

До цього часу в проектуванні гідроакустичних антен проблемним питанням залишалося питання визначення їх електричних полів. Це було пов'язано із тим, що процес проектування антен поділявся на дві складові – власне антени як набір утворюючих їх елементів та гідроакустичні випромінювачі, що утворюють ці

антени. Єдиний методологічний підхід, при якому і антені і перетворювачі розглядались би сумісно при вирішенні задачі випромінювання гідроакустичних сигналів, був відсутній. Тому отримувані при проектуванні перетворювачів розрахункові дані по електричним полям не враховували всіх тих особливостей гідроакустичних антен, які мають місце в на практиці. Існуючі по електричним полям гідроакустичних антен дані відзначаються крайньою скудністю і отримані, в основному, в результаті узагальнення експериментальних даних [88] по п'єзокерамічним перетворювачам. В свою чергу ці дані отримані, виходячи із представлення розрахункових моделей п'єзокерамічних перетворювачів у вигляді еквівалентних електромеханічних схем [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 88], найпростіший вигляд яких на основній резонансній частоті наведено на рис. 4.1 [37].

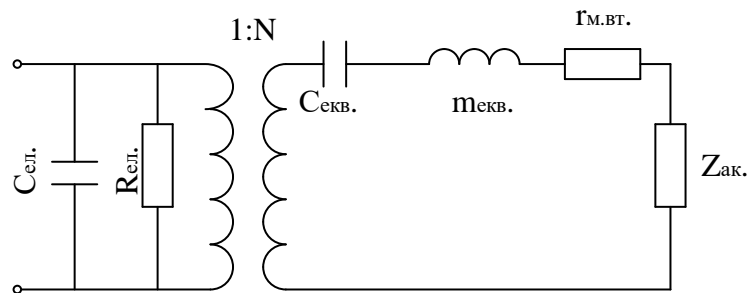


Рис. 4.1. Спрощена еквівалентна електромеханічна схема п'єзокерамічного випромінювача.

Тут  $C_{\text{ел.}}$ ,  $R_{\text{ел.вт}}$  – електрична ємність та опір електричних втрат;  $C_{\text{екв.}}$ ,  $m_{\text{екв.}}$ ,  $r_{\text{м.вт}}$ ,  $Z_{\text{ак.}}$  – відповідно еквівалентні гнучкість та маса, опори механічних втрат та акустичного навантаження;  $N$  – коефіцієнт електромеханічної трансформації випромінювача. Із аналізу схеми рис. 4.1 видно, що вона відображує в дуже спрощеній формі зв'язок електричних, механічних і акустичних полів, які виникають при роботі випромінювача.

Будь-яка гідроакустична станція включає в себе дві частини свого тракту випромінювання – гідроакустичну антену та електронний генератор. Особливістю гідроакустичної станції є те, що вона здійснює не тільки перетворення електричної енергії в акустичну в режимі випромінювання, а і формування останньої в оточуючому середовищі. А це накладає суттєвий відбиток на визначення величини  $Z_{\text{ак.}}$ . Тому при проектуванні генераторних пристроїв проблема визначення їх навантаження зі сторони гідроакустичної антени набуває значних складнощів. На сьогодні вона

вирішується завдяки застосуванню так званих електричних схем заміщення випромінювачів. Вони будуються на основі співставлення електромеханічних схем шляхом перерахунку параметрів механоакустичного ланцюга еквівалентної схеми через коефіцієнт електромеханічної трансформації в електричний ланцюг цієї схеми. Електричні схеми заміщення п'єзокерамічних випромінювачів можуть бути побудовані по паралельній (рис. 4.2 а) або послідовній (рис. 4.2 б) схемам включення двох електричних елементів –  $C_{\text{ел.н.}}$  та опору  $Z_{\text{ел.н.}}$ .



Рис. 4.2 Електричні схеми заміщення випромінювачів

Електрична ємність  $C_{\text{ел.н.}}$  відображує п'єзокерамічну природу активних елементів випромінювачів і обумовлює споживання випромінюючими трактами значного ємнісного струму, який перевантажує випромінюючий тракт та всі лінії комунікацій.

Опір  $Z_{\text{ел.н.}}$  має дві складові – активну та реактивну. Цей опір обумовлює споживання трактом так званого робочого струму [35, 37, 66]. Активна складова цього струму забезпечує появу акустичної потужності, що випромінюється в оточуюче середовище, та неминучі втрати активної потужності, що мають місце в випромінювачі в процесі електромеханічного перетворення енергії. Реактивна складова робочого струму обумовлена зміною характеру реактивності акустичного навантаження випромінювача в процесі його роботи.

Виходячи із існуючих уявлень про електричні схеми заміщення випромінювачів та практики їх застосування, в якості досліджуваних характеристик електричних полів кругової антени з екраном приймемо: повний струм та його складові ємнісну та робочу, що протікають у зовнішніх ланках випромінювачів антени при їх

збудженні; повний вхідний електричний опір випромінювачів та їх активну і реактивну складові.

При визначенні аналітичних виразів для здійснення наступних кількісних оцінок зазначених електричних характеристик будемо виходити з наступного. Перш за все зауважимо, що, виходячи із відношення розмірів п'єзокерамічних випромінювачів до довжини робочих електромагнітних та звукових хвиль, електрична частина випромінювачів може бути представлена зосередженими схемами, а механічна частина – розподіленими в просторі. Тому визначення характеристик механо-акустичних полів випромінювачів з урахуванням еквівалентної схеми рис. 4.1 є в значній мірі суттєво ідеалізованим і обумовлює значні розбіжності між розрахунковими і реальними даними. Ця ідеалізація не враховує особливостей процесів, які мають місце при роботі п'єзокерамічних випромінювачів і антен на їх основі. До них відносяться: взаємодія елементів антени по акустичному полю, обумовлена багатократним обміном випроміненими та відбитими хвилями; взаємодія п'єзокерамічних оболонок випромінювачів з оточуючим середовищем. Ці взаємодії суттєво змінюють акустичні навантаження випромінювачів у складі антени порівняно з такими ж для одиночних випромінювачів. Природно, що зміна акустичного навантаження обумовлює і зміну механічних полів випромінювачів.

Відносно одиночних випромінювачів такі дослідження виконувалися в роботах [15, 18, 27, 33, 35, 50, 55, 58, 60]. Особливу цікавість при визначенні електричних опорів одиночних п'єзокерамічних випромінювачів мають роботи [86, 87], де кількісні розрахункові результати підтверджені експериментальними даними.

Врахуванню впливу всіх видів взаємодії, включно із акустичною взаємодією випромінювачів в антенах, присвячені дослідження результати яких викладені в роботах [55, 70, 71]. Але не всі з них вміщують результати досліджень по впливу цих взаємодій на формування електричних полів випромінювачів в антенах.

Взагалі ж дослідження електричних полів випромінювачів антен з урахуванням всіх видів взаємодій, та ще й в залежності від особливостей конструктивного виконання антен та їх елементів майже відсутні, крім роботи [Саня Дис.].

Визначимо аналітичні вирази, які дозволяють одержувати чисельні значення електричних полів кругових антен з екраном в різних режимах їх випромінення. Частина з цих виразів була наведена в розділі 1. Доповнимо ці співвідношення формулами для розрахунків електричних струмів і вхідних електричних опорів. Природно, що при цьому важливе значення набуває тип поляризації п'єзокераміки, яка застосована у випромінювачах.

Для окружної поляризації п'єзокерамічних оболонок випромінювачів, яка утворюється шляхом паралельного включення призм (рис. 4.1 а) і збудження кожної з них однаковою електричною напругою  $\psi_s$ , повний електричний струм  $I^{(S)}$  у зовнішній ланці випромінювача на одиницю його довжини визначається виразом:

$$I^{(S)} = \sum_{j=1}^{N_s} I_j^{(S)} \quad (0.1)$$

Як було встановлено в розділі 3, акустична взаємодія елементів антени руйнує радіальну симетрію акустичного навантаження циліндричних випромінювачів. Наслідком цього стає неоднорідність кутового розподілу механічних коливань поверхонь випромінювачів, результатом чого стає різна деформація п'єзокерамічних призм оболонок випромінювачів і прив'язка цієї деформації до кутового положення призм в циліндричній оболонці кожного із випромінювачів антени. Оскільки  $I_j^{(S)} = S_{\text{ел}}^{(S)} \partial D_{\varphi j}^{(S)} / \partial t$ , то вираз (4.1) приймає вигляд:

$$I^{(S)} = S_{\text{ел}}^{(S)} \sum_{j=1}^{N_s} \frac{\partial D_{\varphi j}^{(S)}}{\partial t}, \quad (0.2)$$

де  $S_{\text{ел}}^{(S)}$  – площа електрода призми на одиницю її довжини;  $D_{\varphi j}^{(S)}$  – складова електричної індукції  $j$  – тої призми  $s$  – го випромінювача. Складові індукції згідно із роботою [26] Визначаються наступним чином:

- радіальна –  $D_{rj}^{(S)} = 0$ ; осьова  $D_{zj}^{(S)} = 0$ ;
  - окружна  $D_{\varphi j}^{(S)} = \varepsilon_{33j}^{(S)} E_{\varphi j}^{(S)} + e_{31}^{(S)} (\varepsilon_{rj}^{(S)} + \varepsilon_{zzj}^{(S)}) + e_{33j}^{(S)} \varepsilon_{\varphi\varphi j}^{(S)}$ , де  $\varepsilon_{rj}^{(S)} = \partial W_s^{(S)} / \partial r$ ;  $\varepsilon_{zzj}^{(S)} = 0$ ;
- $$\varepsilon_{\varphi\varphi j}^{(S)} = \frac{1}{r^{(S)}} \frac{\partial u_s}{\partial \varphi} + \frac{W_s}{r_s}.$$

Тоді повний струм у зовнішній ланці збудження  $s$  – го випромінювача кругової антени з екраном, враховуючи ідентичність всіх п'єзокерамічних призм оболонок, матиме вигляд:



$$I^{(S)} = -i\omega S_{\text{ел}} \left[ -\varepsilon_{33}^{(S)} \frac{\psi_{0S} N_S^2}{2\pi r_{0S}} + \frac{e_{33}^{(S)}}{r_{0S}} \sum_{j=1}^{N_S} \left[ \sum_n i u_{ns} e^{in \frac{2\pi j}{N_S}} + \sum_n w_{ns} e^{in \frac{2\pi j}{N_S}} \right] \right], S=1, \dots, N. \quad (0.3)$$

Вхідний електричний опір  $s$  – го випромінювача  $Z_{\text{ел}}^{(S)}$  визначається за законом Ома і має наступний вигляд:

$$Z_{\text{ел}}^{(S)} = \frac{\psi_{0S}}{I^{(S)}} \quad (0.4)$$

Для радіальної поляризації п'єзокерамічні оболонки випромінювачів являють собою суцільні циліндри, на бокові поверхні яких наносяться електроди, а електричний струм збудження на одиницю довжини оболонки визначається за виразом:

$$I^{(S)} = \int_{S_{\text{ел}}^{(S)}} \frac{\partial D_r^{(S)}}{\partial t} dS_{\text{ел}}^{(S)} \quad (0.5)$$

де  $dS_{\text{ел}}^{(S)} = r_{0S} d\varphi_S$ ,  $D_r^{(S)}$  – складова електричної індукції.

При радіальній поляризації складові електричної індукції мають вигляд [26]:

- радіальна  $D_r = \varepsilon_{33}^{S(S)} E_r^{(S)} + e_{31}^{(S)} (\varepsilon_{\varphi\varphi}^{(S)} + \varepsilon_{zz}^{(S)}) + e_{33}^{(S)} \varepsilon_{rr}^{(S)}$ ;
- осьова  $D_z^{(S)} = 0$  і окружна  $D_\varphi^{(S)} = 0$ , а напруженість електричного поля становить  $E_r^{(S)} = -\psi_{0S} / h_s$ .

З урахуванням наведених формул повний струм збудження  $s$  – го випромінювача з радіальною поляризацією на одиницю його довжини становитиме:

$$I^{(S)} = -i\omega \int_0^{2\pi} \left[ -\varepsilon_{33}^{S(S)} \frac{\psi_{0S}}{h_s} + \frac{e_{31}}{r_{0S}} \left( \sum_n i u_{ns} e^{in\varphi_S} + \sum_n i w_{ns} e^{in\varphi_S} \right) \right] r_{0S} d\varphi_S, S=1, \dots, N. \quad (0.6)$$

Вхідний електричний імпеданс визначається за законом Ома.

Аналіз виразів (4.3) і (4.6) свідчить, що струм збудження  $s$  – го випромінювача кругової антени з екраном має дві складові – ємнісну та динамічну. Перша визначається першими доданками зазначених виразів, а друга – другими доданками. І якщо в схемах заміщення рис. 4.2 а відносно ємнісного струму все було більш-менш зрозуміло, то з динамічним струмом мала місце повна відсутність якихось даних для виконання необхідних розрахунків. Саме відсутність аналітичних співвідношень для кількісного визначення динамічних струмів були причиною невідповідності розрахункових і реальних даних при проектуванні систем «генератор – антена».

Для визначення властивостей електричних полів випромінювачів кругової антени з екраном від особливостей конструктивного виконання антен їх випромінювачів досліджувалися частотні залежності складових електричного струму та вхідних електричних імпедансів від:

- типу виконання конструкцій випромінювачів та фізичних характеристик середовищ, які заповнюють їх внутрішні об'єми;
- кількості випромінювачів в антені та її розмірів;
- розмірів екрануючого елемента;
- складу застосованої в конструкції випромінювачів п'єзокераміки та характеру її поляризації.

Можливість визначення закономірностей зв'язків електричних полів з іншими фізичними полями кругової антени з екраном при випромінненні гідроакустичних сигналів забезпечувалась вибором однакових для всіх розділів значень параметрів та характеристик елементів конструкцій та антен в цілому.

#### **4.2 Властивості електричних полів кругових циліндричних гідроакустичних антен з екраном, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів силової конструкції**

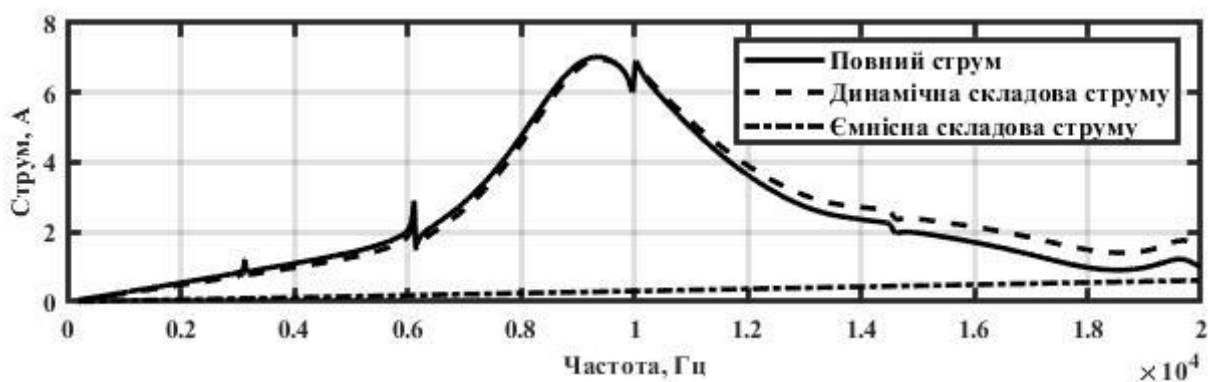
На основі одержаних в попередніх розділах співвідношень визначимо кількісні характеристики впливу на електричні поля антени з екраном використання в її складі циліндричних випромінювачів силової конструкції. Розрахунки частотних залежностей електричного струму та вхідного електричного опору на одиницю довжини випромінювачів виконувалися для наступних значень параметрів:

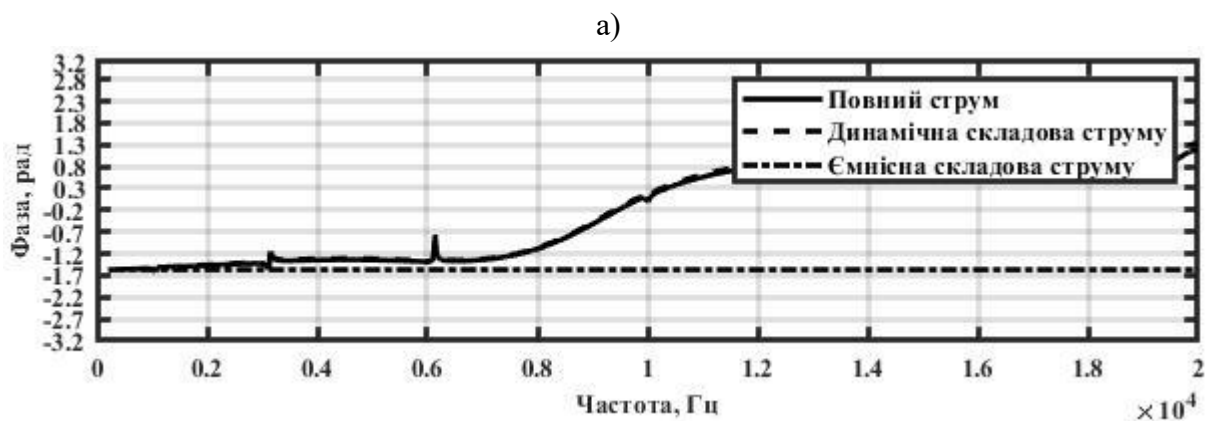
- для антени:  $N = 3$ ; режими випроміннення – круговий і секторний;  $r_{0N+1} = 0,068\text{м}; 0,34\text{м}; R = r_{0N+1} + r_0 + 0,005\text{м};$
- для випромінювачів: п'єзокераміка складу ЦТБС-3; окружна поляризація; електрична напруга збудження  $\psi_0 = 200\text{В};$  внутрішня порожнина вакуумована або заповнена повітрям при нормальному атмосферному тиску;  $r_0 = 0,068\text{м}; h = 0,008\text{м}.$

Аналіз частотних залежностей амплітуд і фаз електричних струмів п'єзокерамічних випромінювачів (рис. 4.3 і 4.4) свідчить про наступне. При всіх

режимах випромінення повні струми в ланках збудження випромінювачів відрізняються як між собою, так і від одиночного випромінювача у всьому частотному діапазоні. При цьому в режимі кругового випромінення повні струми і їх динамічні складові однакові для всіх випромінювачів антени. При секторному випроміненні антени однаковими є повні струми та їх динамічні складові лише у випромінювачів, які симетрично розташовані відносно центрального напрямку випромінення сектора. В той самий час ємнісні складові випромінювачів однакові як для випромінювачів у складі антени, так і поза нею, оскільки мають однакові п'єзокерамічні оболонки.

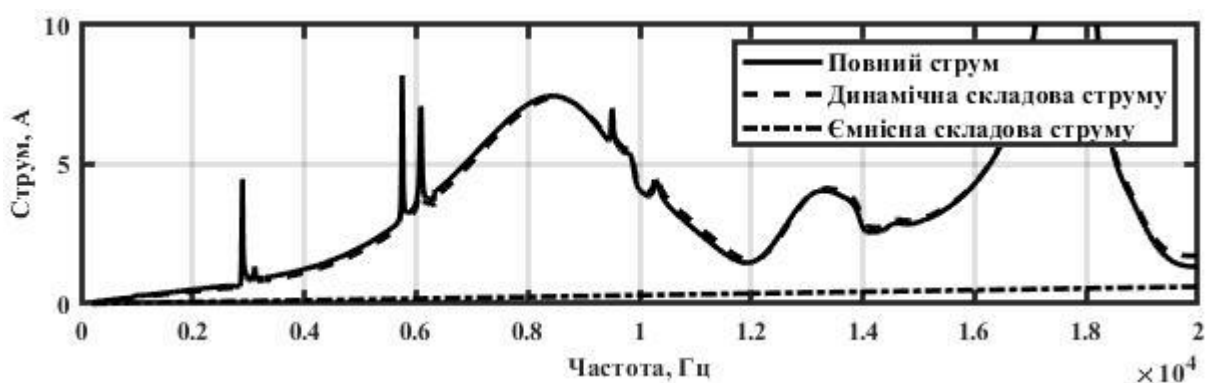
Як і для інших типів фізичних полів антени, в повному струмі збудження випромінювачів можливо виділити три частотні області (рис. 4.3 і 4.4). В низькочастотній області ( $f < 5500 \text{ Гц}$ ) амплітуда повного струму поступово зростає при збільшенні частоти. Причиною цього є збільшення як ємнісного, так і динамічного струмів. При цьому амплітуда ємнісного струму зростає з частотою лінійно, а динамічного – не лінійно. Фази ж обох струмів в цій частотній області змінюються мало. В той самий час в цій області як у повному струмі, так і в його динамічній складовій на певних частотах виникають певні сплески як амплітуди, так і фази. Ці різкі зміни амплітуд та фаз не є резонансами, оскільки, фазові викиди, що відповідають їм не перетинають осі частот. Вони являються реакцією електричних полів п'єзокерамічного випромінювача у складі антени на ті зміни в їх акустичних та механічних полях, які обумовлені, як біло показано в попередніх розділах, взаємодією акустичних полів випромінювачів в антені. Про це свідчить відповідність значень частот сплесків електричних струмів резонансним частотам механічних та акустичних полів випромінювачів в низькочастотній області.



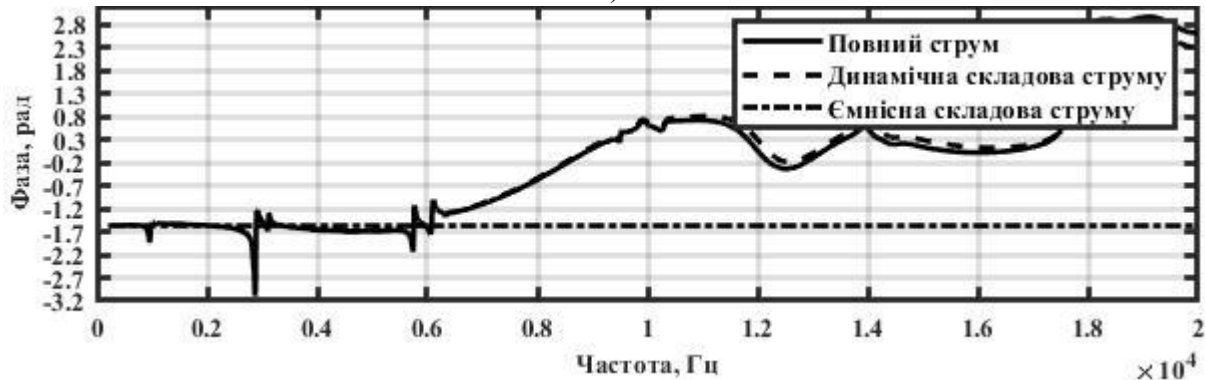


б)

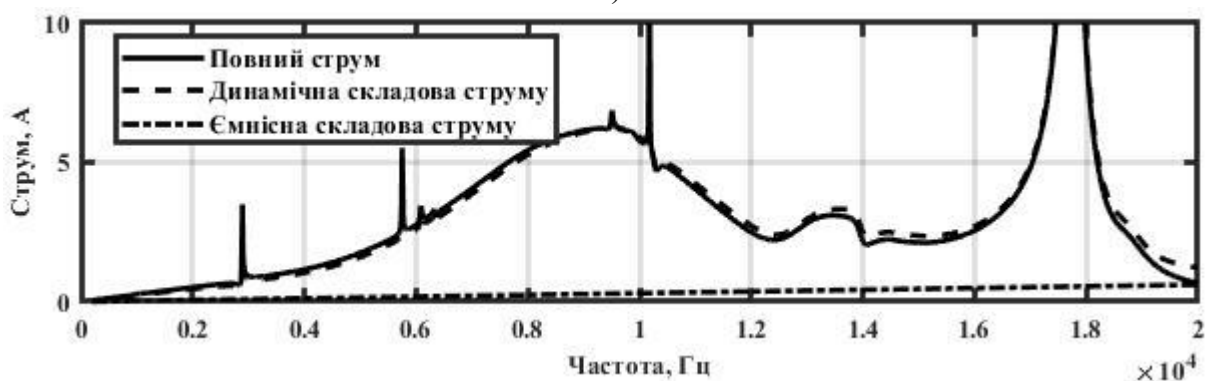
Рис. 4.3 Частотні залежності амплітуд (а) та фаз (б) електричного струму у зовнішніх ланках силових випромінювачів при круговому випромінненні антени з екраном ( $r_{0N+1} = r_0$ ).



а)



б)



в)

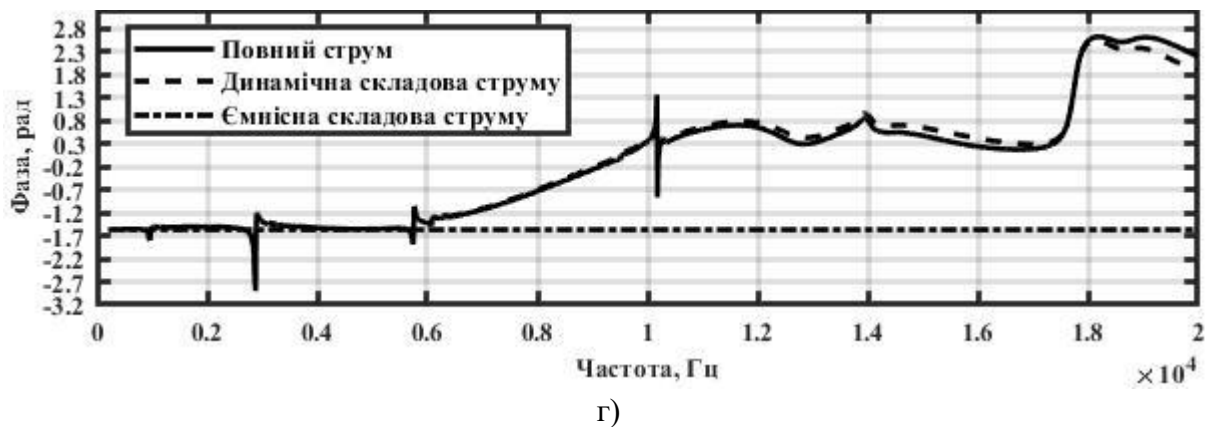


Рис. 4.4 Частотні залежності амплітуд (а, в) та фаз (б, г) електричного струму у зовнішніх ланках центрального (а, б) та крайніх силових випромінювачів при секторному випромінненні кругової антени з екраном ( $r_{0N+1} = r_0$ ).

Наведений аналіз дозволяє зробити висновок про те, що в низькочастотній області зміни амплітуд і фаз повного струму в зовнішніх ланках випромінювачів кругової антени з екраном визначаються закономірностями змін його динамічної складової.

В резонансній області (рис. 4.3 і 4.4) повний струм, як за амплітудою, так і за фазою повністю визначається своєю динамічною складовою і при рівномірному, і при секторному випромінненні. При цьому частотні залежності і повного і динамічного струмів суттєво відрізняються між собою в залежності від характеру збудження випромінювачів і від місця розташування їх в антені та поза нею. Ці відмінності пов'язані як із кількістю сплесків амплітуд струму збудження, так і зі значенням резонансних частот випромінювачів антени. Перехід від режиму кругового випроміннення (рис. 4.3) до режиму секторного випроміннення (рис. 4.4) супроводжується збільшенням кількості сплесків амплітуд струму і зниження значень резонансних частот випромінювачів.

Високочастотна область (рис. 4.3 і 4.4) характеризується значною залежністю повного і динамічного струмів від характеру збудження випромінювачів в антені. В цій області ( $f > 14000 \text{ Гц}$ ) при секторному розміщенні вакуумованих випромінювачів в круговій антені з екраном з'являється (рис.4.2) нова резонансна область, в якій амплітуда струму в декілька разів перевищує амплітуду струму в резонансній області основного резонансу п'єзокерамічних оболонок випромінювачів антени. При цьому смуга цього резонансу у центральних випромінювачів антени

значно перевищує смугу резонансних частот крайніх випромінювачів. Наведений аналіз свідчить про те, що і в цій частотній області повний струм керується його динамічною складовою.

Таким чином, порівнюючи опубліковані дані по частотним залежностям електричних струмів в зовнішніх ланках випромінювачів у складі плоских без екранних антен з одержаними даними для струмів випромінювачів у складі кругової антени з екраном можливо зробити висновок про те, що на відміну від без екранних антен поява ефекту акустичної взаємодії між акустичним екраном і випромінювачами, якого немає у без екранних антен з такими самими випромінювачами, змінює закономірності керування повним струмом випромінювачів його динамічною складовою. Ці зміни полягають в тому, що в круговій антені з екраном повний струм випромінювачів у всьому досліджуваному частотному діапазоні визначається його динамічною складовою.

Розглянемо тепер частотні характеристики вхідних електричних опорів випромінювачів у складі кругових антен з екранами. Як і раніше, кількісні оцінки виконаємо для двох варіантів збудження випромінювачів у складі антен – кругового (рис. 4.5 а) та секторного (рис. 4.5 б, в). Їх аналіз показує, що вони суттєво залежать від характеристик і організації режиму випромінювання антени. При круговому випромінненні всі випромінювачі антени мають однакові частотні залежності складових вхідного електричного опору. При цьому на окремих частотах (рис. 4.5 а) величини активних складових вхідних електричних опорів приймають від’ємні значення. Реактивні опори характеризуються тим, що до частоти механічного резонансу випромінювачів у складі антени вони мають ємнісний характер, а після неї – індуктивний.

Перехід в антені від кругового випромінювання до секторного (рис. 4.5 б, в) здійснює суттєвий вплив на характер поведінки частотних залежностей вхідних електричних опорів випромінювачів антени. Перш за все, це проявляється в тому, що величина і характер поведінки досліджуваних частотних залежностей визначається їх місцем розміщення в антені. При цьому крайні випромінювачі мають однакові величини і характер змін і відрізняються від серединних. Кількість

діапазонів частот, де активні складові опорів приймають від'ємні значення, збільшується, а їх протяжність для серединних випромінювачів стає більшою, ніж для крайніх.

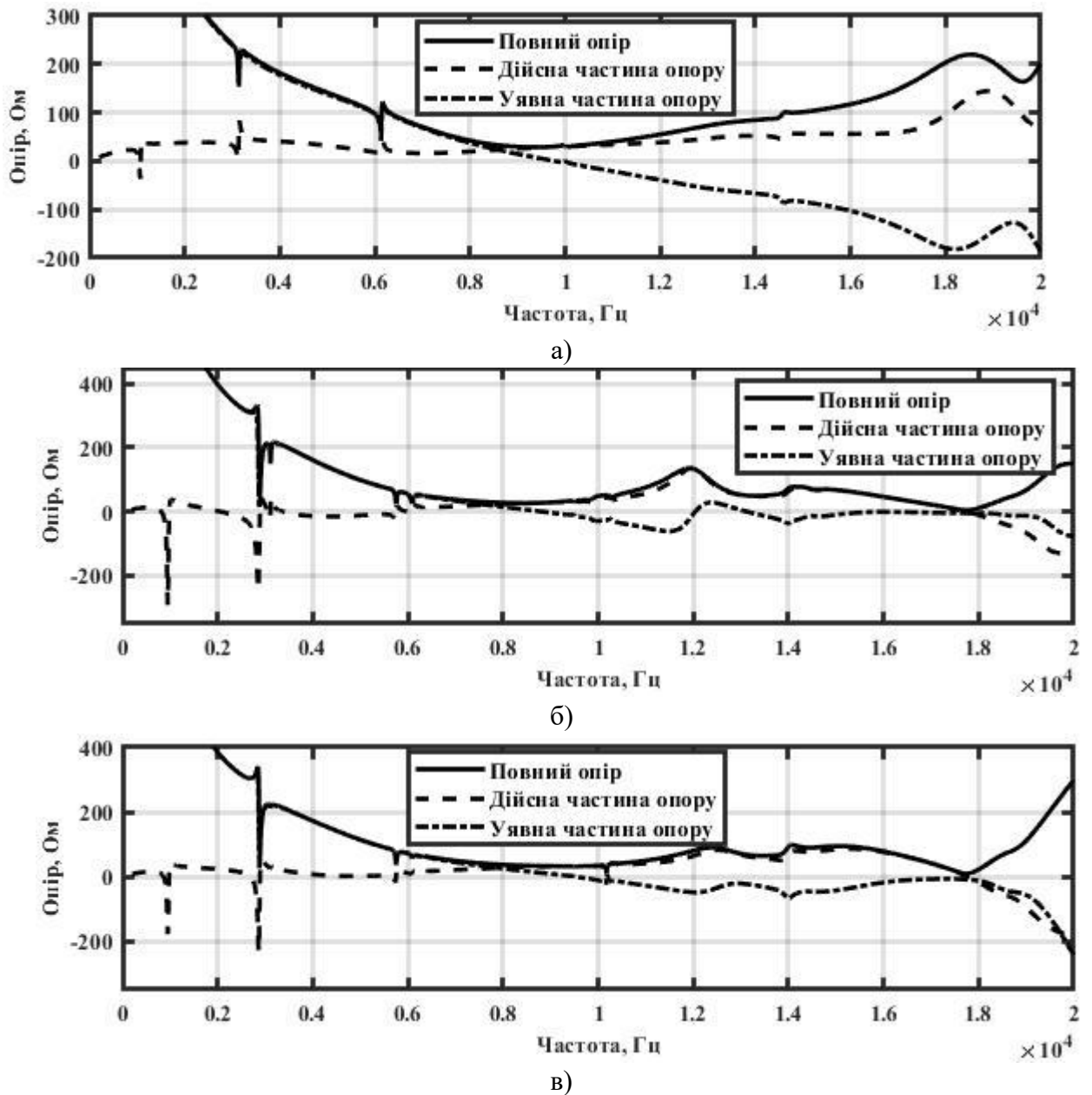


Рис. 4.5 Частотні залежності повного вхідного електричного опору, його активної і реактивної складової, силових випромінювачів у складі кругової антени з екраном ( $r_{0N+1} = r_0$ ) при круговому (а) та секторному (б, в) випромінненні.

В частотних залежностях реактивних складових вхідних опорів з'являється більше ділянок (рис. 4.5 б), де характер їх реактивності змінюється на протилежний. При цьому частотна протяжність таких ділянок відрізняється для крайніх і серединних випромінювачів.

Очевидно, що при заданому однорідному електричному збудженні циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з окружною поляризацією при роботі їх у складі кругової антени з екраном виявлені ефекти будуть негативно впливати на енергетичну ефективність такого типу антен і суттєво ускладнювати узгодження випромінювачів зі збуджуючими їх електронними пристроями.

Виходячи із результатів досліджень акустичних та механічних полів випромінювачів кругових антен з екранами, наведених в попередніх розділах дисертаційної роботи, встановимо фізичні причини викладеної вище поведінки їх електричних полів. В узагальненому вигляді вони полягають в різній симетричності фізичних полів випромінювачів кругової антени з екраном. При вибраному в роботі способі електричного навантаження випромінювачів створювані в їх п'єзокерамічних оболонках електричні поля є радіально симетричними. Тому «закачування» в випромінювачі електричної енергії здійснюється тільки на нульовій моді їх механічних коливань. В той самий час радіаційне акустичне навантаження випромінювачів у складі кругової антени з екраном втрачає свою радіальну симетрію, яку вони мають при роботі поза антеною. Це обумовлено багатократним обміном акустичною енергією випромінених і відбитих акустичних хвиль між випромінювачами і екраном антени. В випромінювачах з порушеною радіальною симетрією акустичного навантаження в механічних полях з'являються наступні за нульовою моди коливань. Як показали результати досліджень механічних полі (розділ 2), амплітуди коливань наступних мод такі самі, або навіть перевищують амплітуду нульової моди. Це свідчить про те, що енергія, яка «закачується» у випромінювачі антени на нульовій моді, ефективно перерозподіляється між наступними модами коливань. Підсумком цього перерозподілу енергії по модам є виникнення в окремих діапазонах частот акустичного поля антени, енергія якого дорівнює або перевищує енергію акустичного поля, створюваного антеною при коливанні її випромінювачів тільки на нульовій моді. Наслідком такого співвідношення між повною енергією акустичного поля антени і тією її частиною, яка створюється тільки на нульовій моді коливань її випромінювачів, є перехід частини випромінювачів антени в цих діапазонах частот із стану випромінення

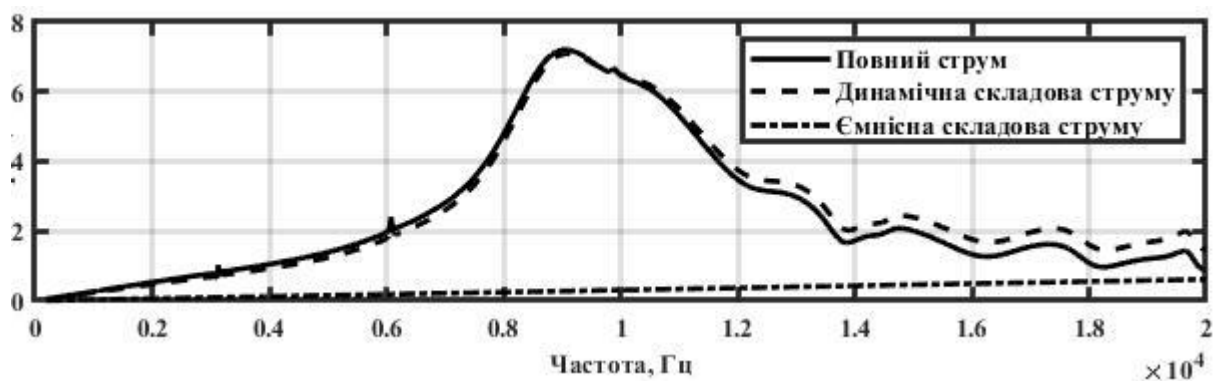


акустичної енергії в зовнішнє середовище в стан поглинання її із цього середовища. При цьому в електричне поле випромінювачів повертається тільки та частина енергії акустичного поля антени, яка відповідає перетворенню її в електричну на нульовій моді механічних коливань випромінювачів антени. Завдяки цьому самі випромінювачі антени перетворюються зі споживачів електричної енергії в її виробників, про що свідчать від'ємні значення активних складових вхідних електричних опорів випромінювачів антени в тих частотних областях, де виникають вказані умови.

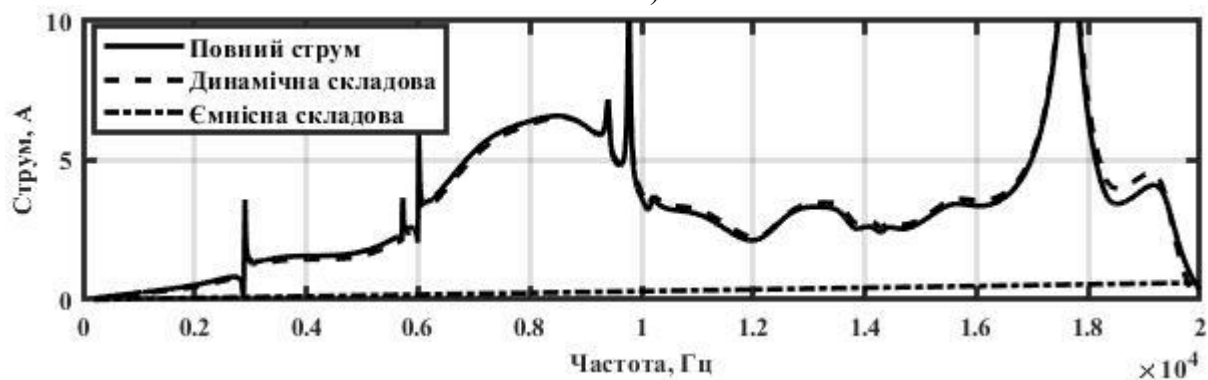
Таким чином, наведений аналіз частотних властивостей електричних полі випромінювачів силової конструкції у складі кругових антен з екраном дозволив виявити ряд фізичних ефектів, які негативно впливають на енергетичну ефективність таких антен. Ці ефекти мають місце в кругових антенах з екраном в режимах як кругового, так і секторного випромінювання.

Одним із конструктивних параметрів кругових антен з екраном є розмір циліндричного акустично м'якого екрана. Розглянемо, як впливає зміна цього розміру на електричні поля силових випромінювачів досліджуваних антен. Аналіз кривих рис. 4.6 і співставлення їх з кривими рис. 4.3 і 4.4 свідчить про те, що основний вплив на електричні поля випромінювачів у складі досліджуваної антени здійснює саме введення до її складу акустичного екрану, а не його розміри. Дійсно, суттєве (в 5 разів) збільшення розмірів екрану слабо впливає на електричний струм в низькочастотній та високочастотній областях при всіх режимах випромінювання. Найбільші зміни настають в резонансній області і при секторному випромінюванні антен. До того ж наведені криві демонструють суттєву залежність цих змін від місця розташування випромінювачів в секторі кругової антени з екраном.

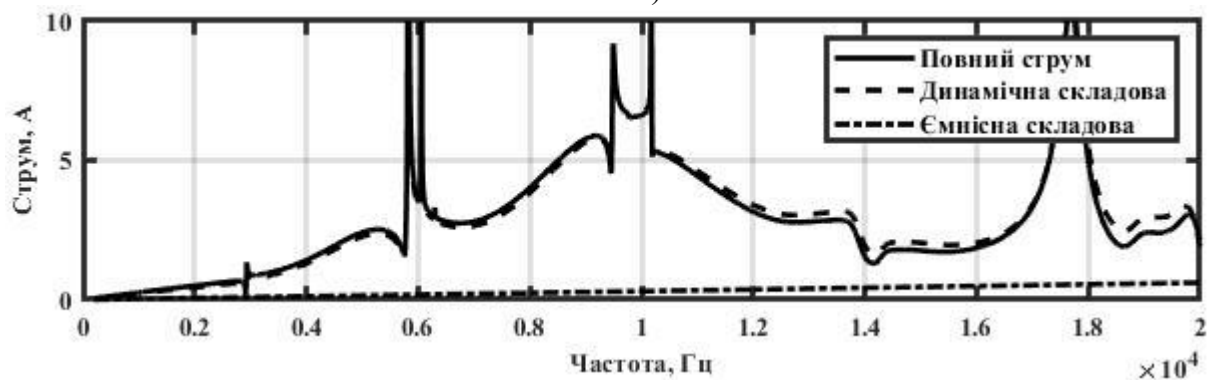
При цьому крайні випромінювачі сектора (рис. 4.6 в) в резонансній області мають більшу деформацію резонансної кривої, ніж центральні (рис. 4.6 б).



а)

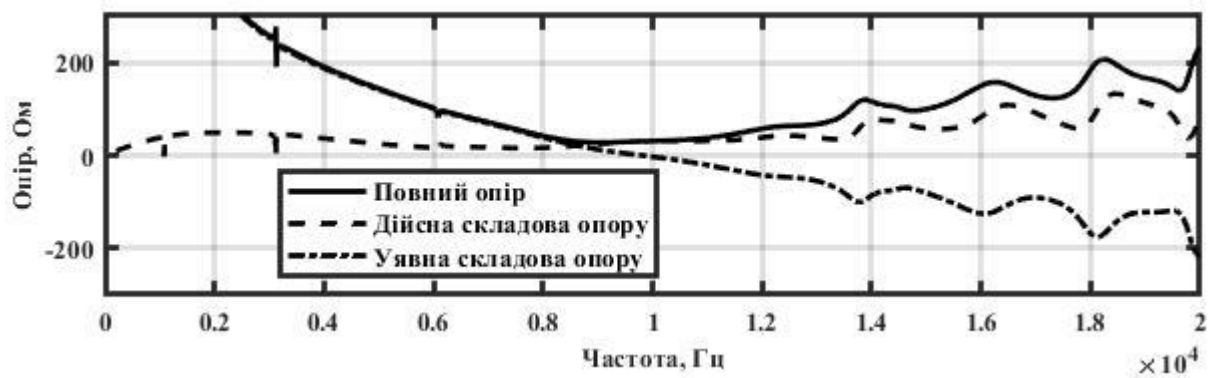


б)



в)

Рис. 4.6 Частотні залежності амплітуд електричного струму збудження силових ( $\rho_2 c_2 / \rho c = 0$ ) випромінювачів кругових антен з екраном ( $r_{0N+1} = 5 \cdot r_0$ ) при круговому (а) та секторному (б, в) випромінненні.



а)

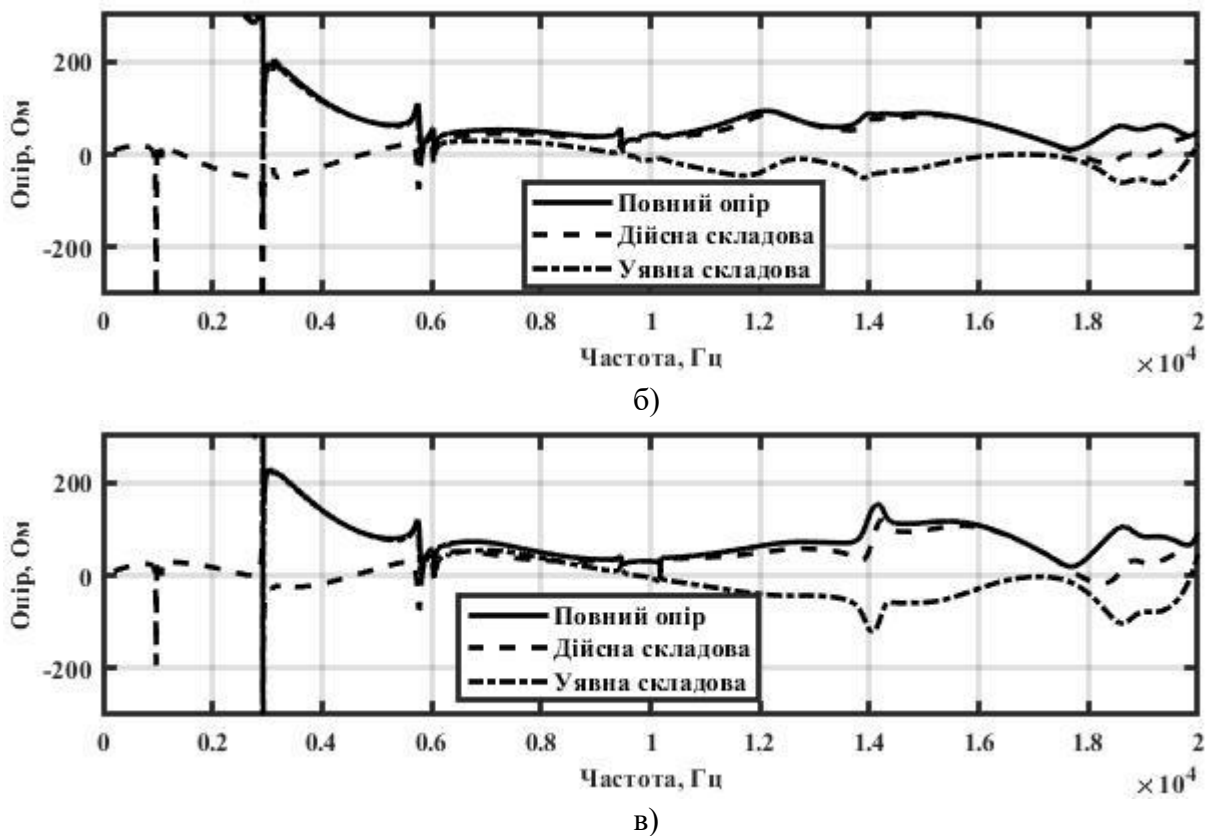


Рис. 4.7 Частотні залежності повного вхідного електричного опору, його активної та реактивної складових силових ( $\rho_2 c_2 / \rho c = 0$ ) випромінювачів кругових антен з екраном ( $r_{0N+1} = 5 \cdot r_0$ ) при круговому (а) та секторному (б, в) випромінненні.

Цікаві результати демонструють дослідження впливу зміни розмірів екрану на вхідні електричні опори випромінювачів у складі кругових антен з екраном. Аналіз графіків рис. 4.7 та 4.5 показує, що в цілому збільшення розмірів акустичного екрану має малий вплив на частотні залежності вхідних електричних опорів випромінювачів кругової антени з екраном як при круговому, так і при секторному режимах випроміннення. В той самий час звертає на себе увагу одна характерна особливість активної складової вхідного електричного опору. Вона полягає в тому, що в антенах з більшим екраном частотні області з від'ємними значеннями активного опору суттєво зменшуються при всіх режимах випроміннення кругових антен з екраном. Це свідчить про наступне. По-перше, антени з екраном більших розмірів мають енергетичну ефективність в більшому частотному діапазоні. І, по-друге, змінами розмірів екрану можна керувати енергетичною ефективністю досліджуваних антен в заданих діапазонах.

### 4.3 Властивості електричних полів кругових циліндричних гідроакустичних антен з екраном, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів компенсованої конструкції.

Дослідимо, як зміняться властивості електричних полів, коли кругові антени з екраном будуть утворені із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів компенсованої конструкції. Розглянемо наступні варіанти:

– внутрішні об'єми випромінювачів заповнені рідинами з наступними хвильовими опорами –  $\rho_2 c_2 = \rho c$  і  $\rho_2 c_2 = 0,5 \cdot \rho c$ , де  $\rho c$  – хвильовий опір зовнішнього середовища – води;

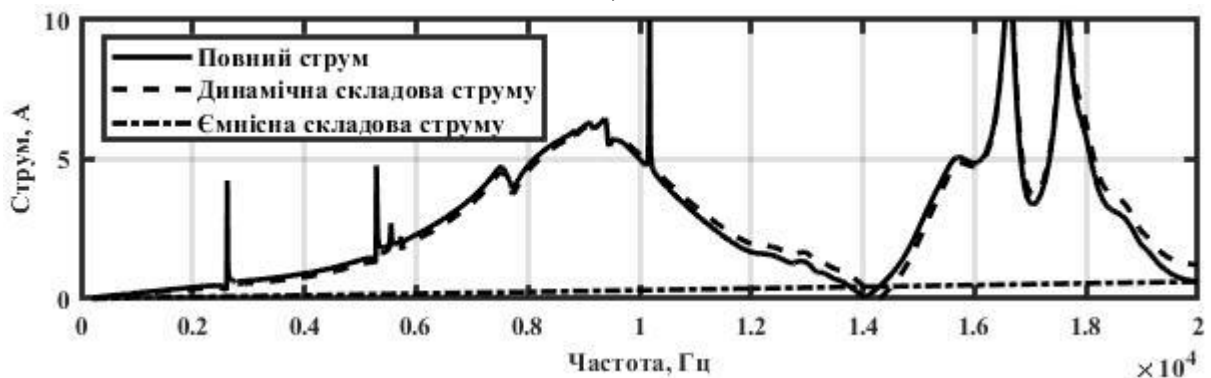
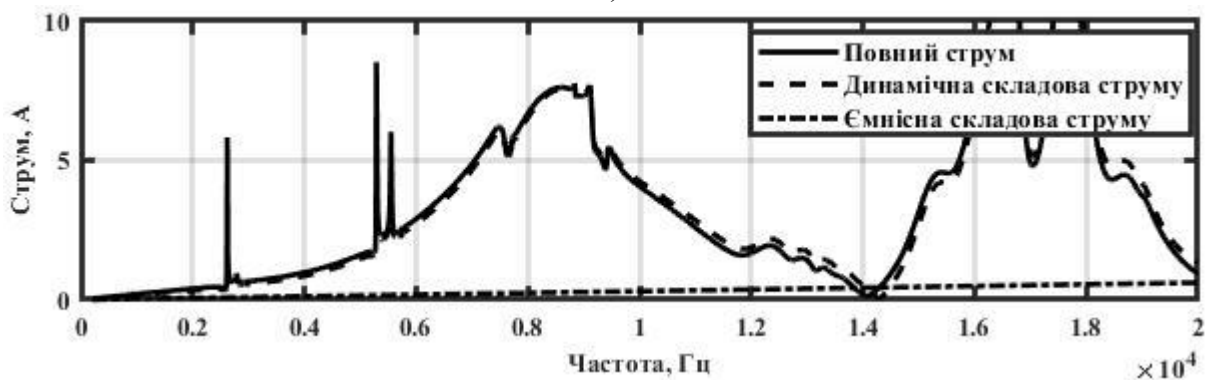
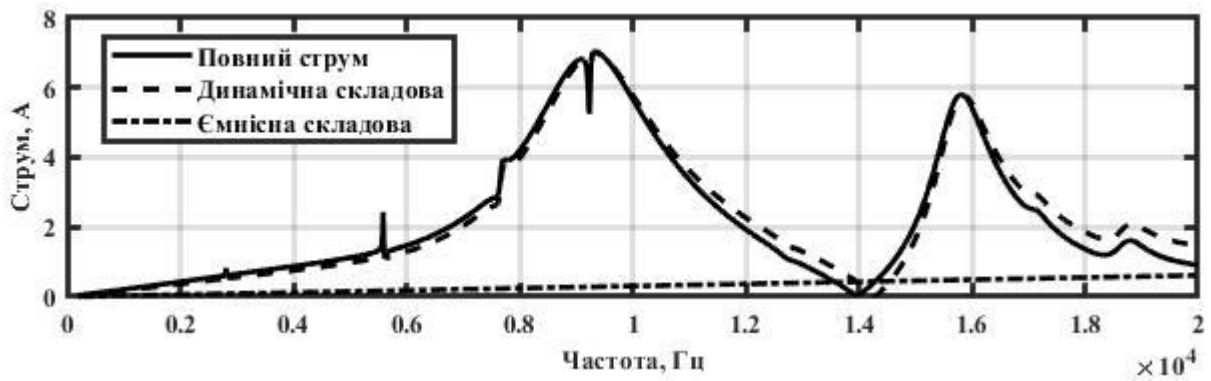
– розміри акустичного екрану становлять –  $r_{0N+1} = r_0; 5 \cdot r_0$ .

Аналіз частотних залежностей електричних струмів компенсованих випромінювачів і співставлення їх з такими ж залежностями для силових випромінювачів свідчать про те, що в круговій антені з екраном ефективність вимушених коливань випромінювачів, викликана електричним струмом в їх зовнішніх ланках, суттєво залежить від співвідношення хвильових опорів внутрішнього і зовнішнього середовищ.

Як і у випадку силових конструкцій, електричний струм у зовнішніх ланках водозаповнених випромінювачів ( $\rho_2 c_2 = \rho c$ ) кругової антени з екраном являє собою суму двох струмів – ємнісного і динамічного (рис. 4.8). Ємнісний струм визначається поведінкою п'єзокерамічного випромінювача як специфічного конденсатора і його величина залежить від складу використаної у випромінювачі п'єзокераміки. Динамічний струм є результатом зв'язаності всіх трьох фізичних полів при роботі випромінювачів у складі досліджуваної антени, а його величина визначається ступенем цієї зв'язаності. Їх частотні залежності (рис. 4.8) свідчать про те, що при будь-якому режимі випромінювання ємнісні струми ідентичних випромінювачів в круговій антені однакові для всіх випромінювачів, а динамічні струми відрізняються між собою як для різних режимів, так і для одного із них. При цьому в розглянутому діапазоні частот величини динамічних струмів значно перевищують величини ємнісних струмів. Тому поведінка повного струму

збудження випромінювачів у цьому діапазоні частот повністю визначається поведінкою його динамічної складової.

Аналіз кривих (рис. 4.8 а) свідчить про те, що в режимі кругового випромінювання кругової антени з екраном її випромінювачі збуджуються однаковим динамічним струмом. Але на відміну від випромінювачів силової конструкції (рис. 4.3) частотна залежність водозаповнених випромінювачів характеризується більшими амплітудами сплесків струму і меншими їх частотними смугами в низькочастотній області, причому амплітуди сплесків такі самі, або навіть і більші за амплітуди струмів в резонансній області п'єзокерамічних оболонок випромінювачів. Крім того, не всі ці сплески є резонансними, оскільки фази більшості струмів на частотах сплесків не перетинають вісь абсцис.



в)

Рис. 4.8 Частотні залежності амплітуд електричних струмів збудження водозаповнених випромінювачів при круговому (а) та секторному (б, в) випромінненні кругової антени з екраном  
( $r_{0N+1} = r_0$ )

В області механічного резонансу оболонок водозаповнених випромінювачів ( $5500\text{Гц} < f < 14000\text{Гц}$ ) кількість провалів амплітуд струмів залишаються такими ж як і у силових випромінювачів.

Суттєвих змін зазнає частотна залежність динамічного струму водозаповненого випромінювача у високочастотній області (рис. 4.6 а). Ці зміни полягають в появі ще однієї резонансної кривої з доволі широкою резонансною смугою. Із співставлення кривих рис. 4.3 і 4.8 можливо зробити висновок, що цей резонанс обумовлений пружним середовищем внутрішнього об'єму випромінювачів антени.

При переході в круговій антені з екраном до режиму секторного випроміннення (рис. 4.8 б, в) характер поведінки динамічного струму випромінювача стає залежним від місця розміщення їх в антені. При цьому розміщені симетрично в секторі випромінювачі мають однакові динамічні струми, а їх частотні залежності суттєво відрізняються по мірі віддалення випромінювачів від лінії симетрії сектора випроміннення. Заповнення водою внутрішніх об'ємів випромінювачів в круговій антені з екраном при секторному випромінненні (рис. 4.8 б, в) порівняно із круговим (рис. 4.6 а) має такі ж наслідки, як і для антен із силовими випромінювачами (рис. 4.3 і 4.4). Вони полягають у збільшенні кількості провалів на частотних залежностях амплітуд і фаз струмів, появі дуже великих сплесків їх амплітуд у вузько-частотних смугах, які є резонансами, в низькому та резонансному діапазонах частот. Особливу цікавість викликає роздвоєність резонансного викиду в високочастотному діапазоні та значне зменшення його резонансної смуги у крайніх випромінювачів антени порівняно із середніми. В цілому ж величина збуджуючого струму випромінювачів більша при секторному режимі роботи антени порівняно із круговим і у середніх випромінювачів сектора порівняно із крайніми.

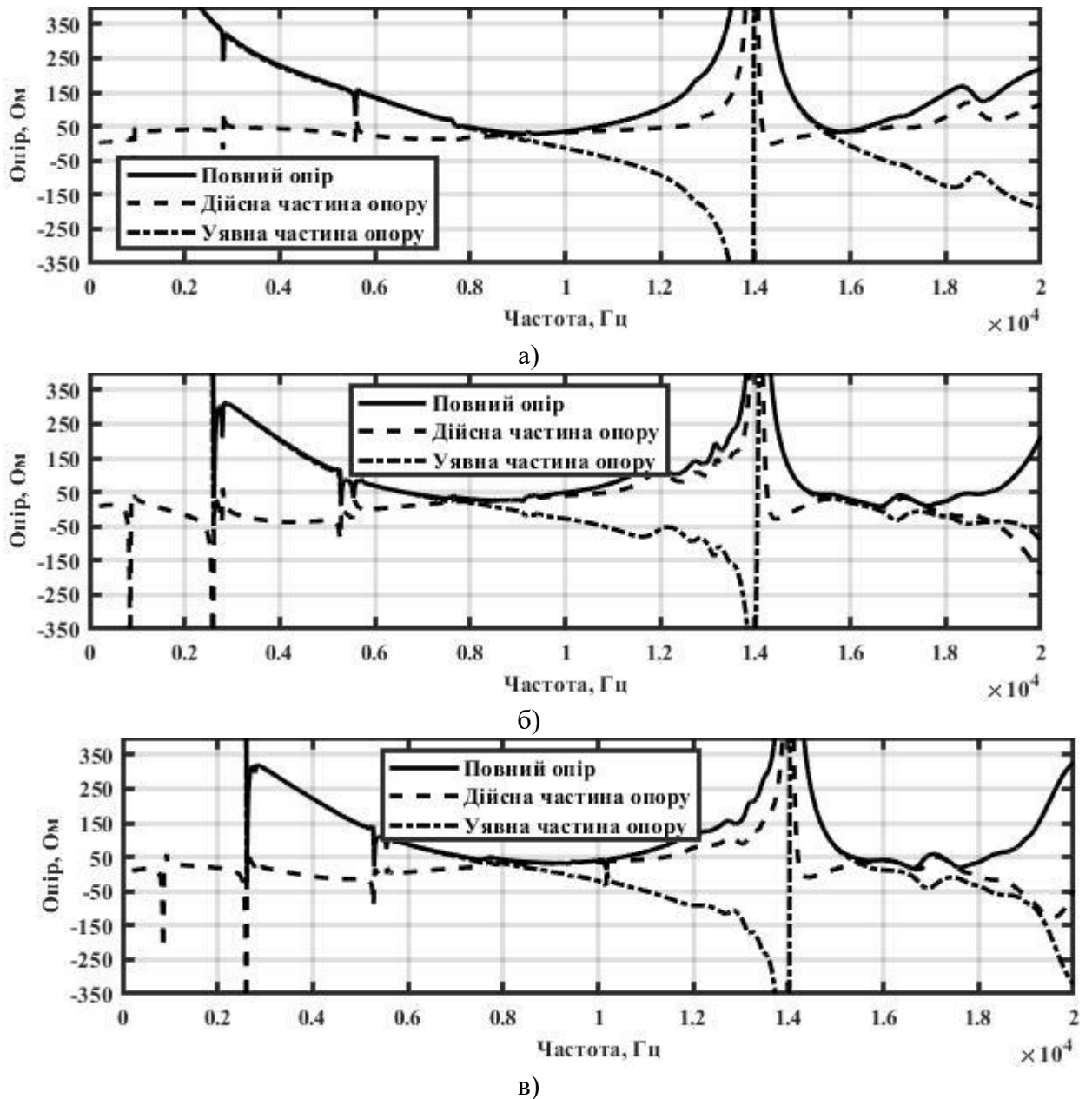
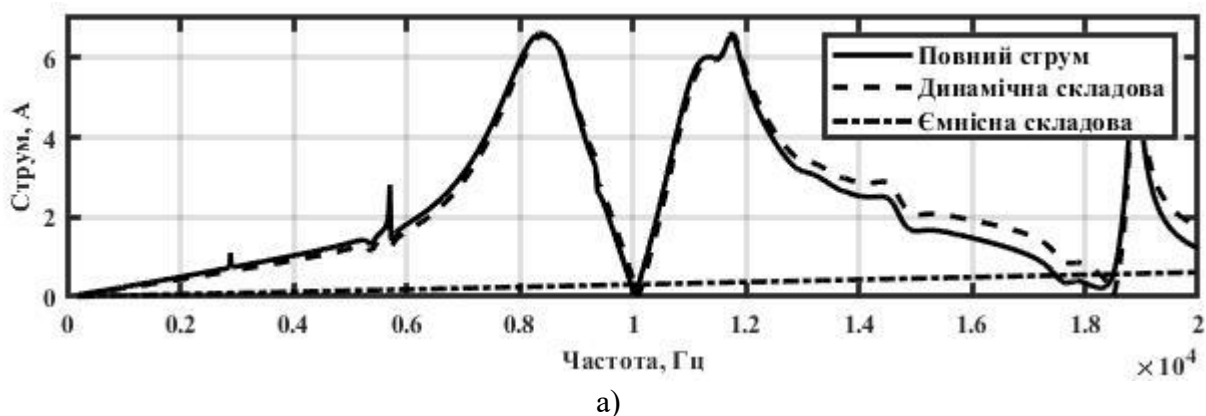


Рис. 4.9 Частотні залежності повного вхідного електричного опору, його активної та реактивної складових водозаповнених випромінювачів у складі кругової антени з екраном ( $r_{0N+1} = r_0$ ) при круговому (а) та секторному (б, в) випромінненні.

При аналізі частотних залежностей вхідних електричних опорів водозаповнених випромінювачів у складі кругової антени з екраном (рис. 4.9) звертає на себе увагу, як і у випадку з такими ж антенами, але утвореними із силових випромінювачів, ряд цікавих ефектів, які, на перший погляд, можуть показатися парадоксальним. Так, при аналізі кривих рис. 4.7 видно, що на окремих частотах активні складові повних електричних опорів випромінювачів перетворюються в нуль. Більше того, вони можуть приймати навіть від'ємні значення і не тільки на окремих частотах, але й в діапазонах частот. Це свідчить про те, що тих частотах, де  $\text{Re}Z_{\text{ел.вх}}^{(S)} = 0$ , відповідні

випромінювачі кругової антени з екраном не споживають електричну енергію від електричних пристроїв, які збуджують ці випромінювачі. У випадку, коли  $\text{Re}Z_{\text{ел.вх}}^{(S)} < 0$ , окремі випромінювачі кругової антени з екраном не тільки не споживають енергію від своїх електронних пристроїв збудження, а, навпаки, віддають їм цю енергію, перетворюючись в цих діапазонах частот із споживачів електричної енергії в її виробників. Складний характер частотної залежності відрізняє також і реактивну складову вхідних електричних опорів випромінювачів кругової системи з екраном як в режимах кругового, так і секторного випромінювання. Встановлені в результаті досліджень наведені ефекти можуть негативно позначитися на енергетичній ефективності досліджуваних антен і суттєво ускладнити узгодження п'єзокерамічних випромінювачів зі збуджуючими їх електронними пристроями. Тому обираючи певним чином параметри елементів кругової антени з екраном і самої антени можливо керувати характеристиками електричного поля антени для досягнення необхідних їх значень.

Як вже було сказано, фізичними причинами виникнення встановлених ефектів являється радіальна симетричність електричних полів випромінювачів антени при вибраному способі нанесення електродів на поверхні їх п'єзокерамічних оболонок і порушення радіальної симетрії акустичних полів, які створюються випромінювачами у складі кругової антени з екраном завдяки багатократному обміну випроміненими і розсіяними акустичними хвилями між всіма елементами антени.





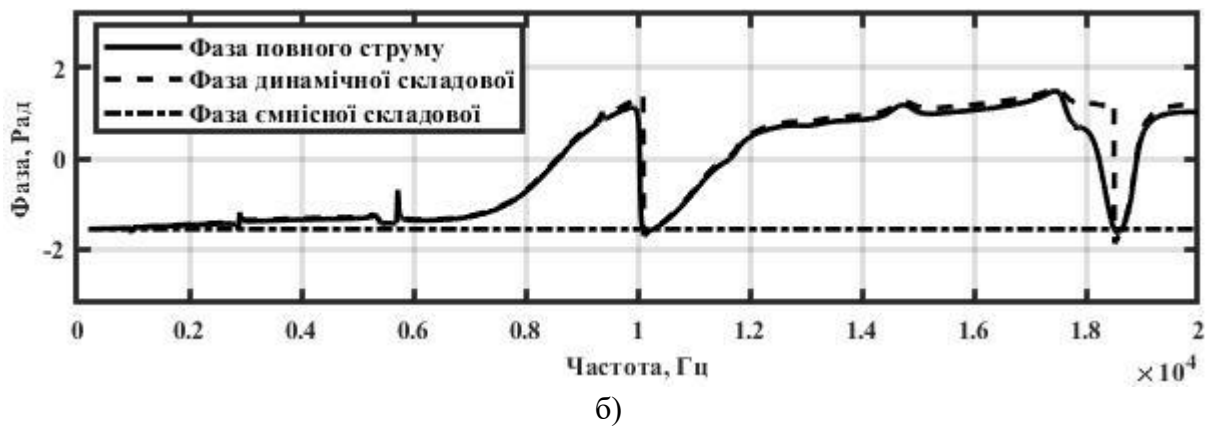
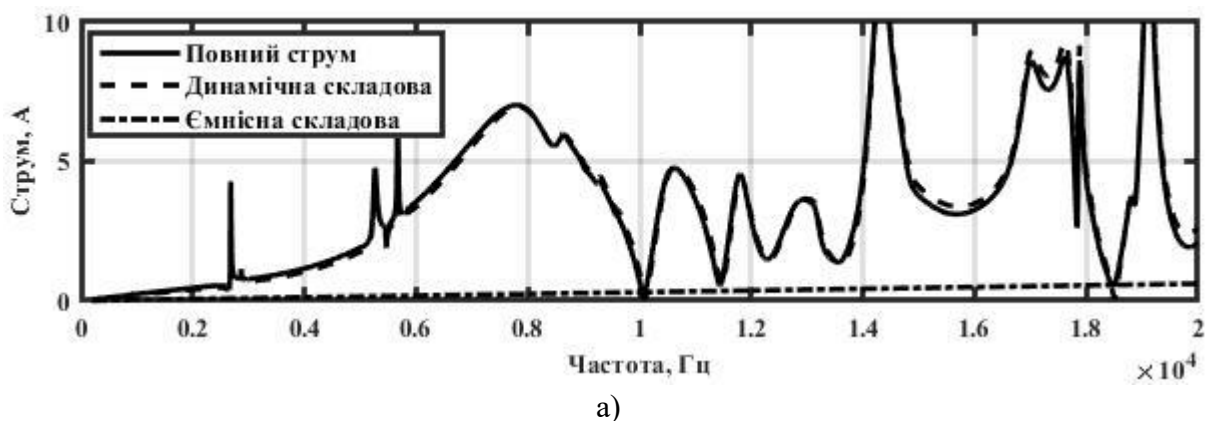


Рис. 4.10 частотні залежності амплітуд (а) і фаз (б) електричних струмів збудженні компенсованих випромінювачів ( $\rho_2 c_2 / \rho c = 0,5$ ) при круговому випромінненні кругових антен з екраном ( $r_{0N+1} = r_0$ ).

Розглянемо тепер, як змінюються збуджуючі електричні поля компенсованих випромінювачів у складі кругової антени з екраном при зміні фізичних характеристик речовин у внутрішніх об'ємах випромінювачів. Аналіз частотних залежностей струмів (рис. 4.10) свідчить про те, що при круговому випромінненні (рис. 4.10 а) в низькочастотній області при зменшенні відношення  $\rho_2 c_2 / \rho c$  з 1 до 0,5 всі струми майже не змінюються. Суттєві зміни настають в резонансній та високочастотній областях. В резонансній області провал у водозаповнених (рис. 4.6 а) випромінювачів поступово збільшується і при  $\rho_2 c_2 / \rho c = 0,5$  розділяє частотну характеристику резонансної області п'єзокерамічних оболонок випромінювачів на дві майже однакові половини. При цьому фази повного та динамічного струмів на резонансній частоті оболонок змінюють свій характер на протилежний. Має місце резонанс струмів (рис. 4.10 б). Високочастотна область характеризується збільшенням частоти наступного резонансу струмів порівняно із водозаповненими випромінювачами.



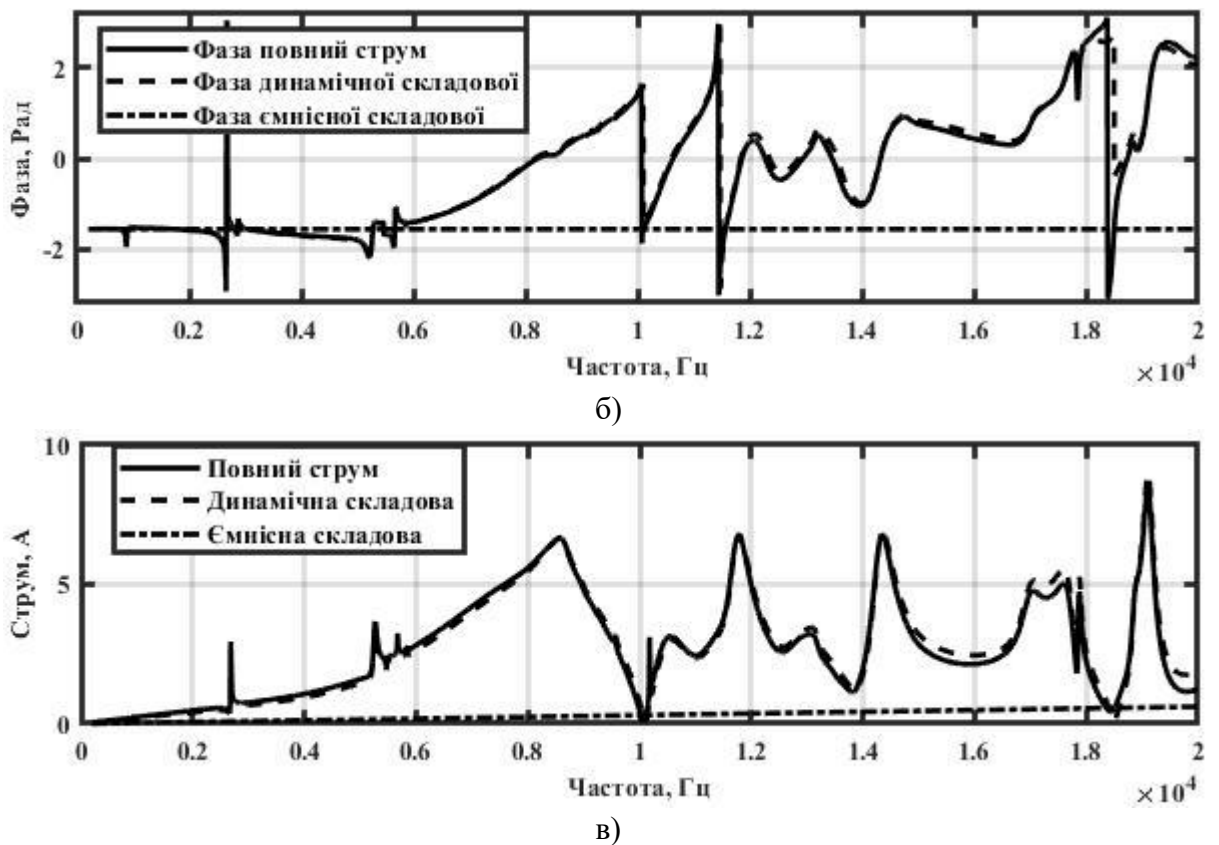
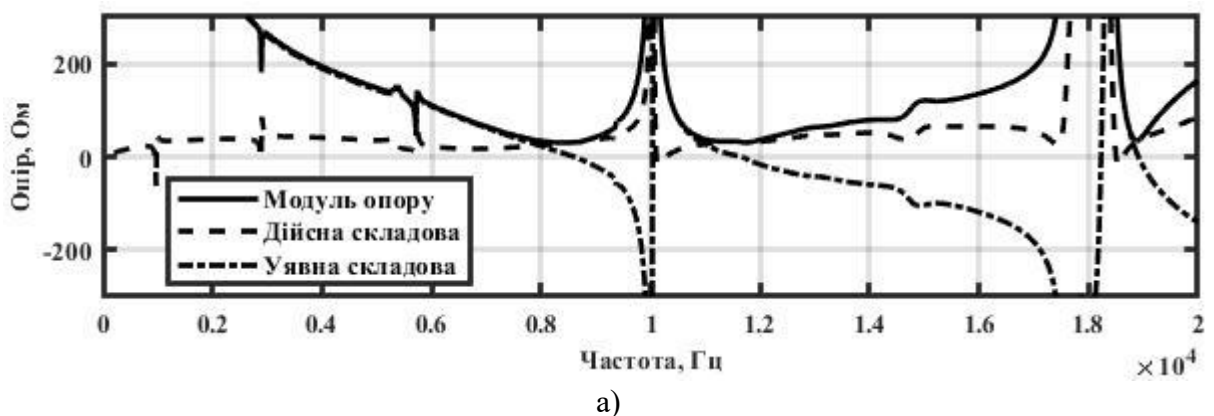


Рис. 4.11 Частотні залежності амплітуд (а, в) та фаз (б) електричних струмів збудження компенсованих ( $\rho_2 c_2 / \rho c = 0,5$ ) центрального (а, б) та крайніх (в) випромінювачів кругової антени з екраном ( $r_{0N+1} = r_0$ ) при секторному випромінненні

Перехід від кругового (рис. 4.10) до секторного (рис. 4.11) випроміннення при зміні хвильового опору рідини  $\rho_2 c_2 / \rho c$  з 1 до 0,5 у внутрішніх об'ємах випромінювачів обумовлює суттєві зміни в частотних залежностях повних і динамічних струмів. При цьому слід відзначити ряд особливостей. По-перше, від частотних залежностей як амплітуд, так і фаз струмів залежить від місця розташування випромінювачів в секторі випроміннення. По-друге, в низькочастотній області відповідні частоти амплітудних вузькосмугових сплесків струмів є близькими для різних випромінювачів у всіх режимах випроміннення. При цьому тільки деякі з них відповідають умовам резонансу струмів (рис. 4.11 б). Однаковість значень частот сплесків амплітуд струмів обумовлена тим, що в механічних полях різних випромінювачів кругових антен з екраном відповідні резонанси утворюються однаковими модами коливань. По-третє, амплітуди сплесків струмів в низькочастотній області за величиною є різними для випромінювачів в різних режимах роботи антени. Це обумовлено різними співвідношеннями амплітуд та фаз

коливальних швидкостей різних мод коливань в механічних полях відповідних випромінювачів на цих частотах. По-четверте, в зовнішніх ланках збудження випромінювачів окрім резонансу струмів виникають і резонанси напруги (рис. 4.11 б), а кількість цих різних резонансів залежить від місця розміщення випромінювачів в досліджуваних антенах.

Наведений вище складний характер поведінки частотних залежностей струмів збудження компенсованих випромінювачів у складі кругової антени з екраном при заповненні їх внутрішніх об'ємів рідинами із  $\rho_2 c_2 / \rho c < 1$  накладає свій відбиток і на вхідний електричний опір цих випромінювачів. В цілому його частотні залежності (рис. 4.12) мають ті ж самі особливості, що і у відповідних водозаповнених випромінювачів. Зокрема, в низькочастотній області частотні залежності всіх вхідних опорів випромінювачів, хвильові опори внутрішні рідини яких знаходяться в межах  $0,5 \leq \rho_2 c_2 / \rho c \leq 1,0$ , мало відрізняються між собою. В той самий час в інших частотних областях ці зміни, по-перше, є дуже значними і, по-друге, суттєво залежать від місця розташування випромінювача в круговій антені з екраном. В резонансній області при рівномірному розміщенні випромінювачів виникає вузький діапазон частот (рис. 4.10 а), де активний перехід цих випромінювачів із режиму випромінення акустичної енергії в режим її поглинання із акустичного поля і перетворення їх із споживачів електричної енергії в її виробників. Фізичні причини такої поведінки досліджуваних типів випромінювачів є такими ж, як і у водозаповнених випромінювачів у складі кругових антен з екраном.



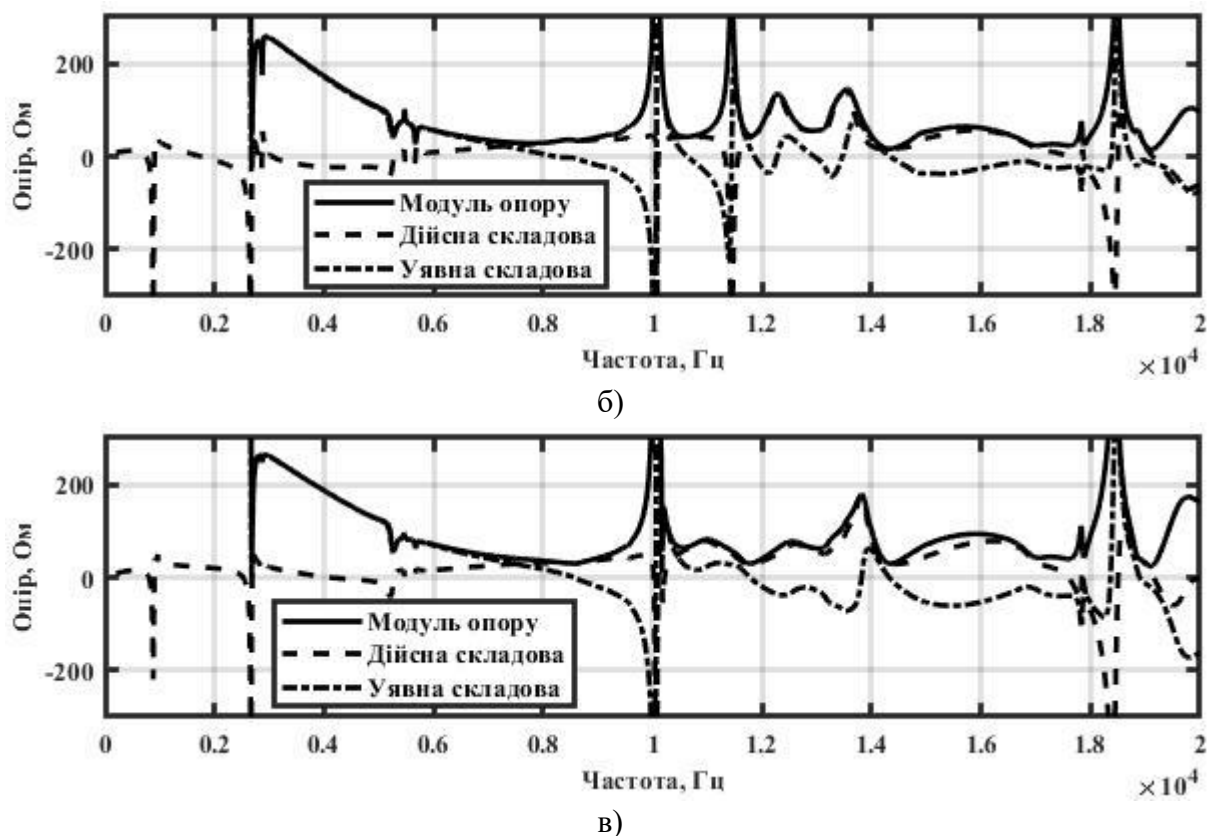


Рис. 4.12 Частотні залежності повного вхідного електричного опору, його активної та реактивної складових компенсованих випромінювачів кругової антени з екраном ( $r_{0N+1} = r_0$ ) при круговому (а) та секторному (б, в) випромінюванні.

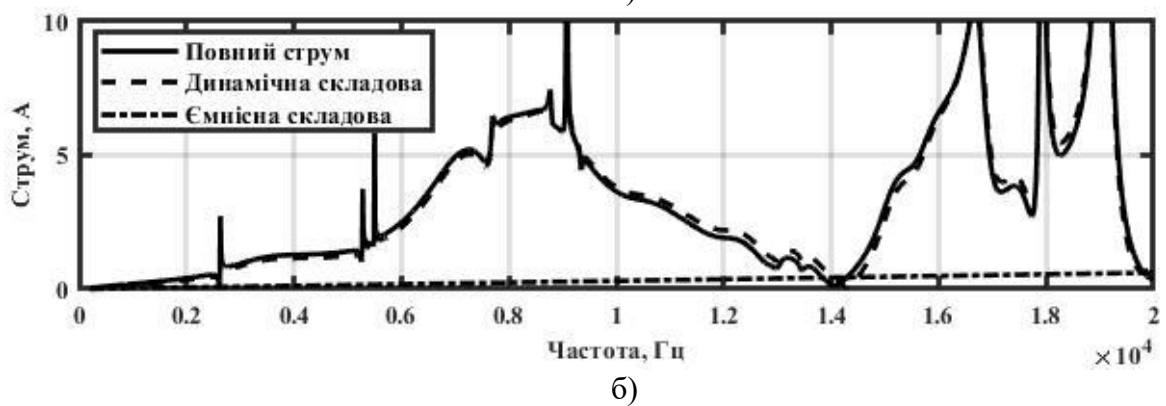
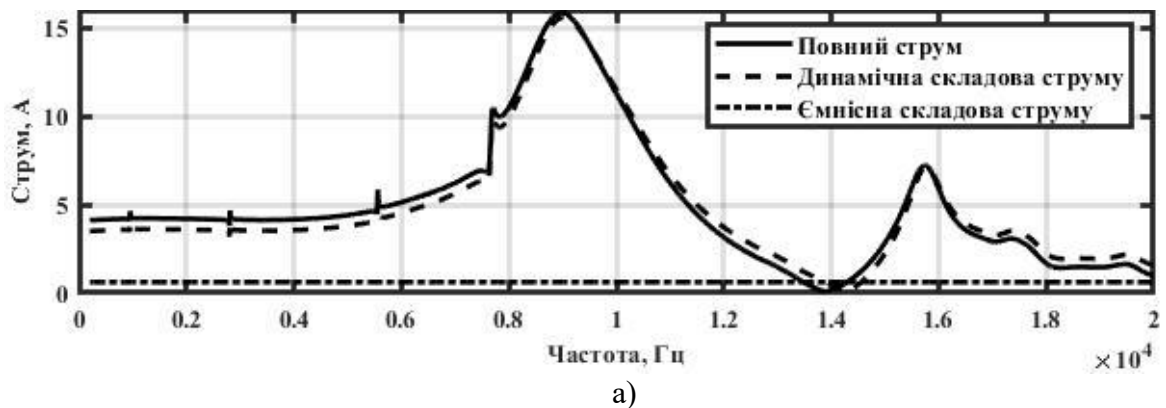
При переході до секторного випромінювання, який супроводжується зменшенням відстаней між випромінювачами, кількість діапазонів частот в резонансній області з від'ємними значеннями активного вхідного опору (рис. 4.12 б, в) збільшується, а їх значення зростають. При цьому один із цих діапазонів є дуже вузькосмуговим і співпадає із частотою основного резонансу п'єзокерамічної оболонки випромінювача.

В цій же резонансній області реактивний вхідний опір при різних режимах випромінювання багаторазово змінює свій характер з ємнісного на індуктивний. Це суттєво ускладнює задачу узгодження опорів збуджуючого генератора та збуджуваного випромінювача з метою досягнення максимізації випромінюваної енергії. В високочастотній області картина, наведена для резонансної області, практично повторюється, але з іншими числовими значеннями.

Тепер розглянемо ті зміни, які виникають в електричних полях випромінювачів компенсованої конструкції у складі кругових антен з екраном при зміні розмірів акустичних екранів.

Аналіз графіків рис. 4.13 та 4.8 дозволяє виявити ті зміни в ефективності збудження коливань водозаповнених випромінювачів, які обумовлені змінами розмірів екранів. Співставлення графіків показує, що збільшення розмірів екрану мало впливає на ефективність збудження коливань в низькочастотній області при всіх режимах випромінювання. Основні зміни набувають своєї сили в резонансній і високочастотній областях. В цих частотних областях амплітуди струмів при збільшенні розмірів екрану набувають більш різких змін, які залежать від режиму випромінювання та місця розташування випромінювача в секторі кругової антени з екраном.

Аналіз впливу розмірів екрану на частотні залежності вхідних електричних опорів випромінювачів (рис. 4.14) свідчить про ті ж самі тенденції впливу, які були встановлені при дослідженні силових випромінювачів у складі кругових антен з екраном.



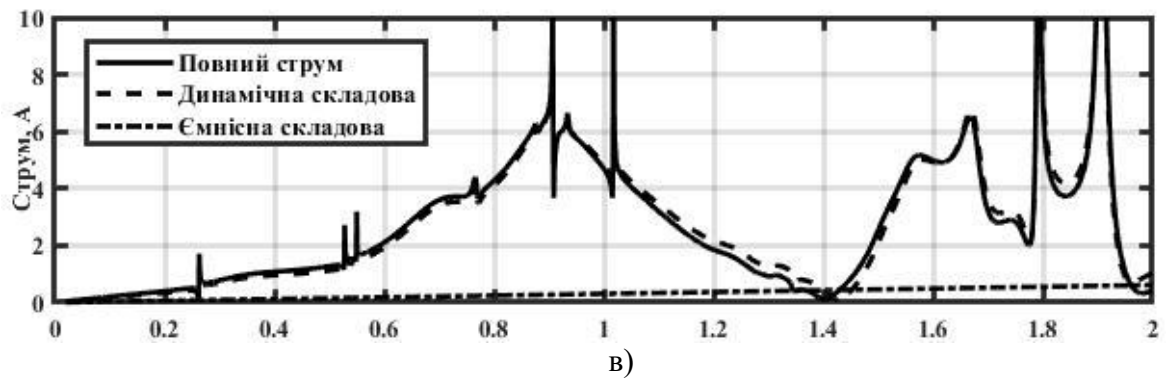


Рис. 4.13 Частотні залежності амплітуд електричних струмів збудження водозаповнених випромінювачів кругової антени з екраном ( $r_{0N+1} = 5 \cdot r_0$ ) при круговому (а) та секторному (б, в) випромінюванні.

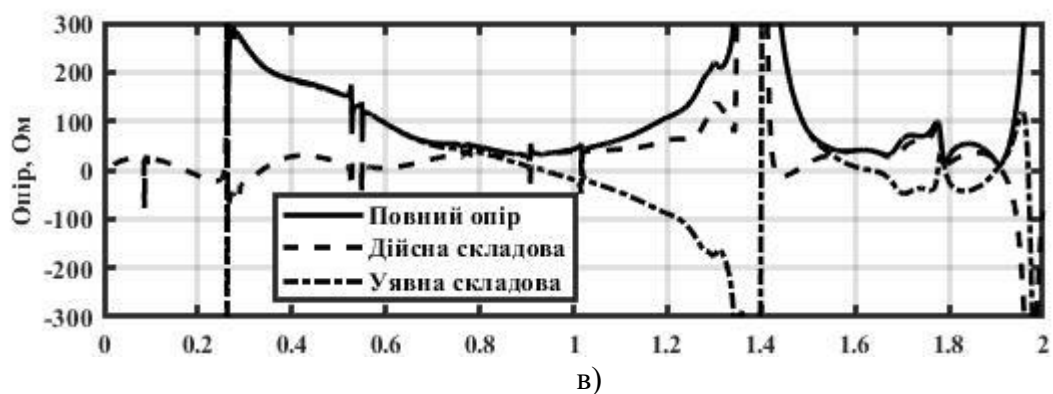
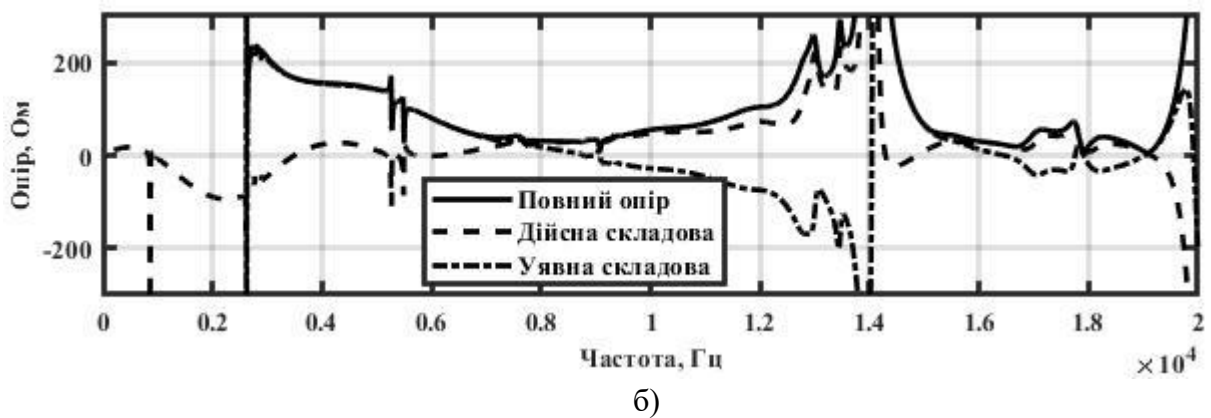
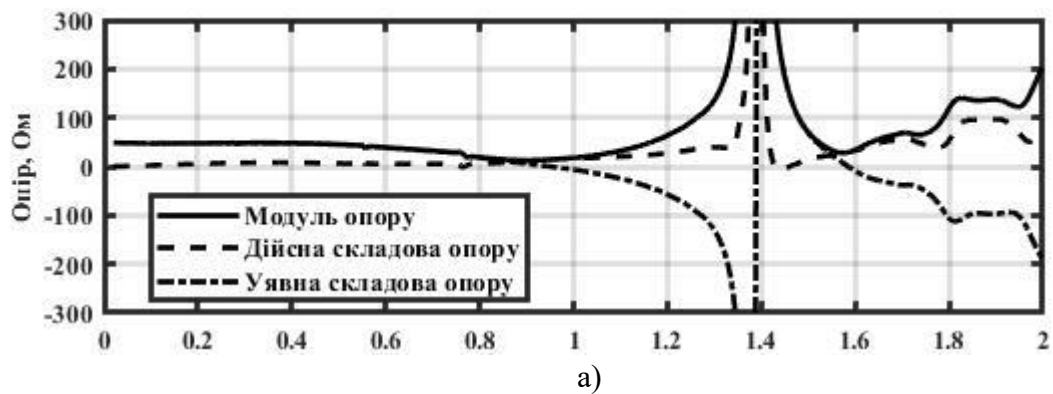


Рис. 4.14 Частотні залежності повного вхідного електричного опору, його активної та реактивної складових водозаповнених випромінювачів кругової антени

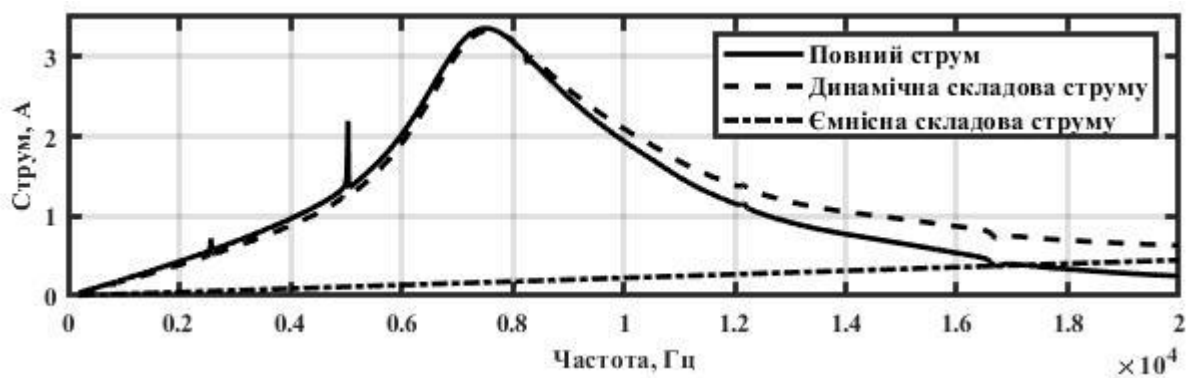
з екраном ( $r_{0N+1} = 5 \cdot r_0$ ) при круговому (а) та секторному (б, в) випромінненні.

#### **4.4 Властивості електричних полів кругових циліндричних гідроакустичних антен з екраном, в залежності від складу застосованої в конструкції випромінювача п'єзокераміки та її поляризації**

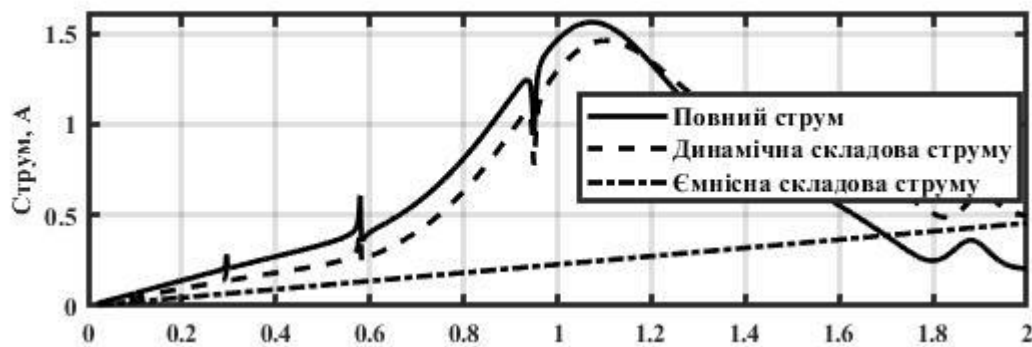
Суттєвим конструкційним елементом випромінювачів кругових антен з екраном є склад п'єзокераміки, застосованої при побудові цих випромінювачів, та характер її поляризації.

Дослідимо, як впливають ці конструкційні чинники на властивості електричних полів випромінювачів у складі кругових антен з екраном. Як і раніше, будемо розглядати два режими випроміннення антени – круговий і секторний. В якості досліджуваних характеристик визначимо частотні залежності електричного струму та вхідного електричного опору випромінювачів на одиницю їх довжини. Відповідні чисельні експерименти виконувалися для наступних параметрів антен: кількість ідентичних випромінювачів  $N = 3$ ; розміри випромінювачів –  $r_0 = 0,068\text{ м}$ ;  $h = 0,008\text{ м}$ ; п'єзокераміка у їх складі – ЦТС-19, ТБК-3; внутрішні об'єми випромінювачів – вакуумовані; екран у складі антени – акустично м'який, радіус якого  $r_{0N+1} = 0,068\text{ м}$ ; відстань між поверхнями випромінювачів і екрану –  $0,003\text{ м}$ ; Електрична напруга збудження –  $\psi_0 = 200\text{ В}$ , в частотному діапазоні  $(0 \div 20000)\text{ Гц}$ .

Аналіз частотних залежностей (рис. 4.3 та 4.15) амплітуд і фаз електричних струмів випромінювачів з різним складом п'єзокераміки у складі кругової антени з екраном при круговому випромінненні дозволяє встановити наступне. По-перше, склад п'єзокераміки визначає ефективність перетворення електричних коливань в механічні при однаковій електричній напрузі збудження. Це природно, оскільки всі ці склади відрізняються між собою значеннями



а)



б)

Рис. 4.15 Частотні залежності амплітуд електричних струмів випромінювачів із п'єзокераміки складу ЦТС-19 (а) та ТБК-3 (б) кругової антени з екраном при круговому випромінюванні.

електрофізичних сталих п'єзокераміки. Найбільшою ефективністю відрізняється п'єзокераміка складу ЦТБС-3 (рис. 4.3), оскільки випромінювачі, виготовлені із неї, мають найбільші амплітуди струму. Найменшу ефективність, в 5–6 разів нижчу порівняно із ЦТБС-3, має ТБК-3 (рис. 4.15 б). По-друге, резонансні частоти струмів змінюються в залежності від параметрів п'єзокераміки. Відповідно змінюються і частотні залежності амплітуд і фаз струмів. Таким же чином змінюються і частоти амплітудних сплесків струмів в низькочастотній і резонансній областях. По-третє, встановлені при аналізі властивостей електричних струмів випромінювачів, які утворені зі складу ЦТБС-3, закономірності зберігаються і при зміні складів п'єзокераміки у випромінювачах.

Дуже цікавими є малі зміни в частотних залежностях вхідних електричних опорів випромінювачів при зміні складу їх п'єзокераміки (рис. 4.5 і 4.16). Ці зміни, в основному, характерні для випромінювачів зі складу ТБК і полягають у збільшенні величини вхідних електричних опорів (рис. 4.16 б).



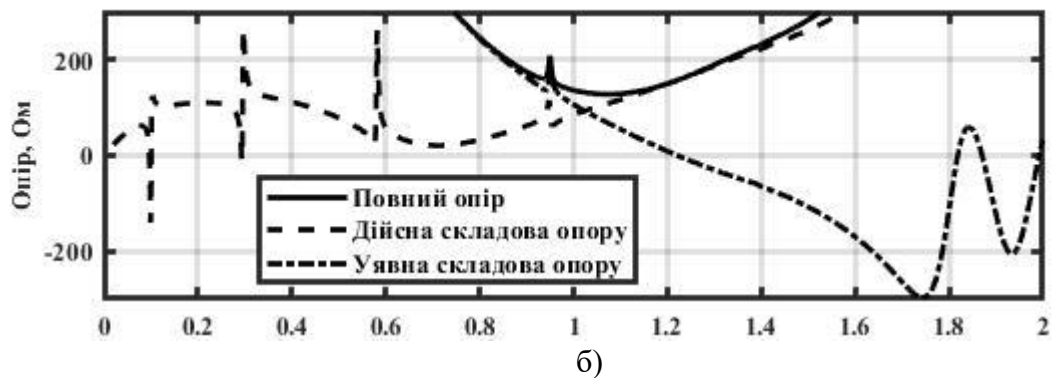
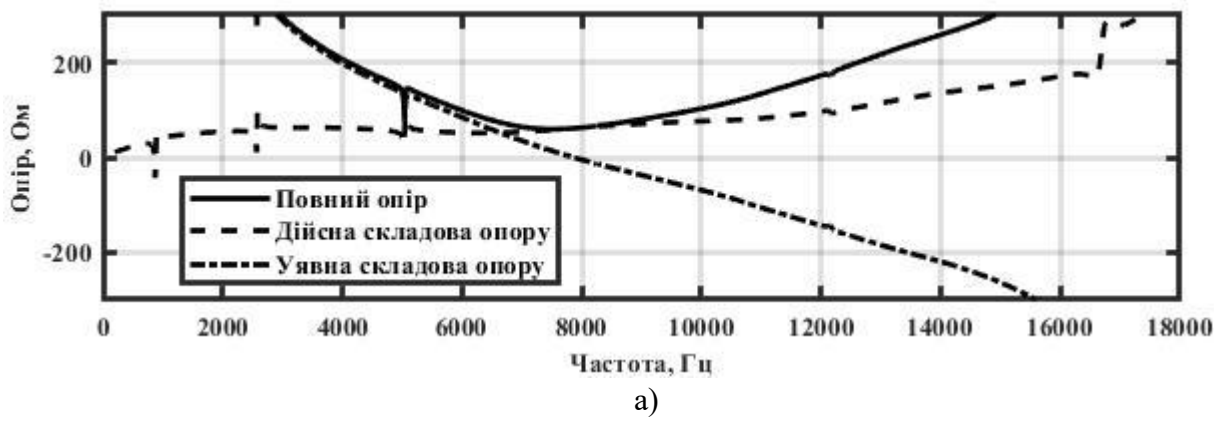
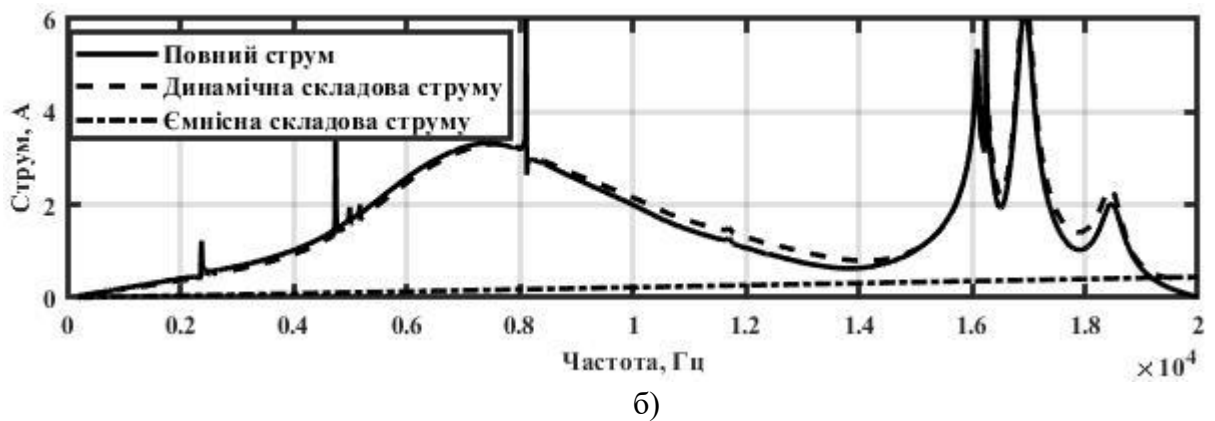
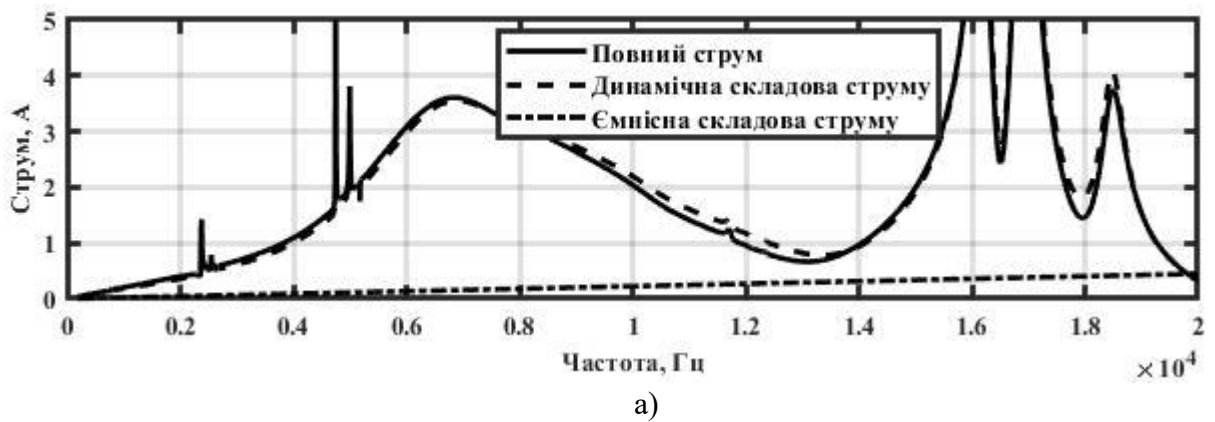
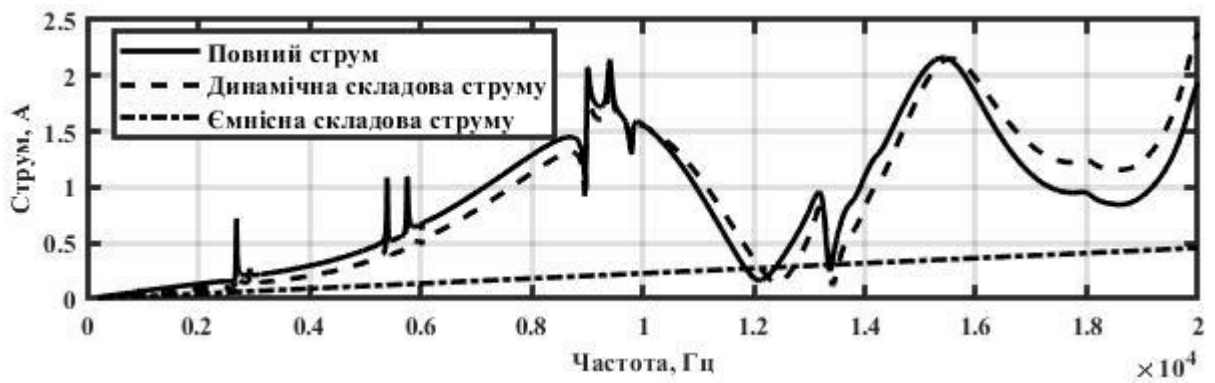
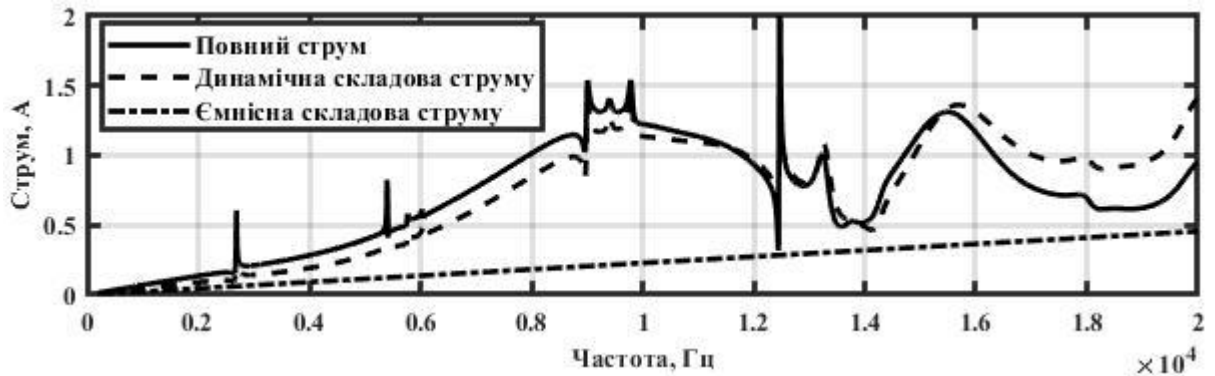


Рис. 4.16 Частотні залежності електричного опору та його складових випромінювачів із п'єзокераміки складу ЦТС-19 (а) та ТБК-3 (б)



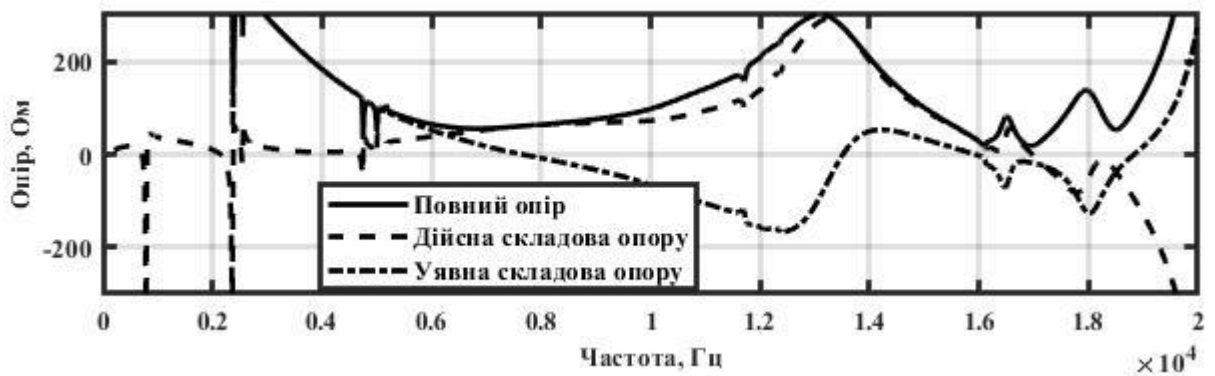


в)

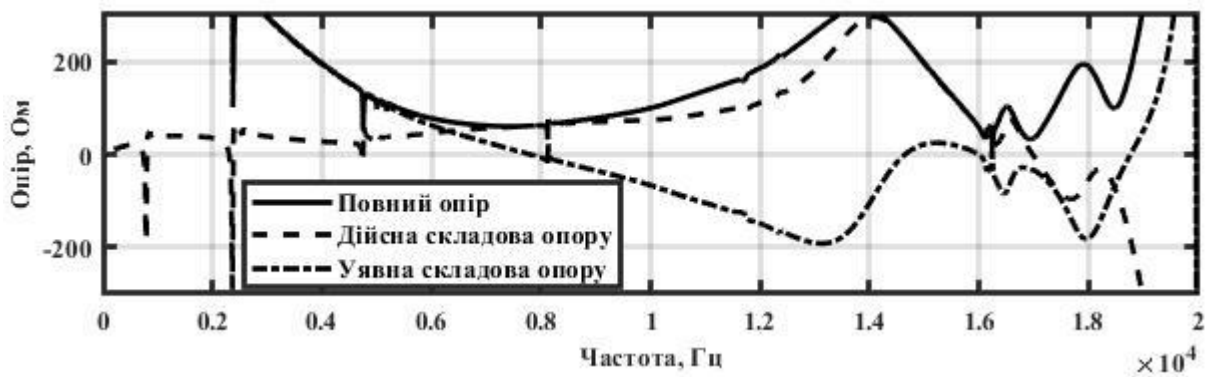


г)

Рис. 4.17 Частотні залежності амплітуд електричних струмів середнього (а, в) та крайніх (б, г) випромінювачів із п'єзокераміки складу ЦТС-19(а, б) та ТБК-3 (в, г) кругової антени з екраном при секторному випромінненні.



а)



б)

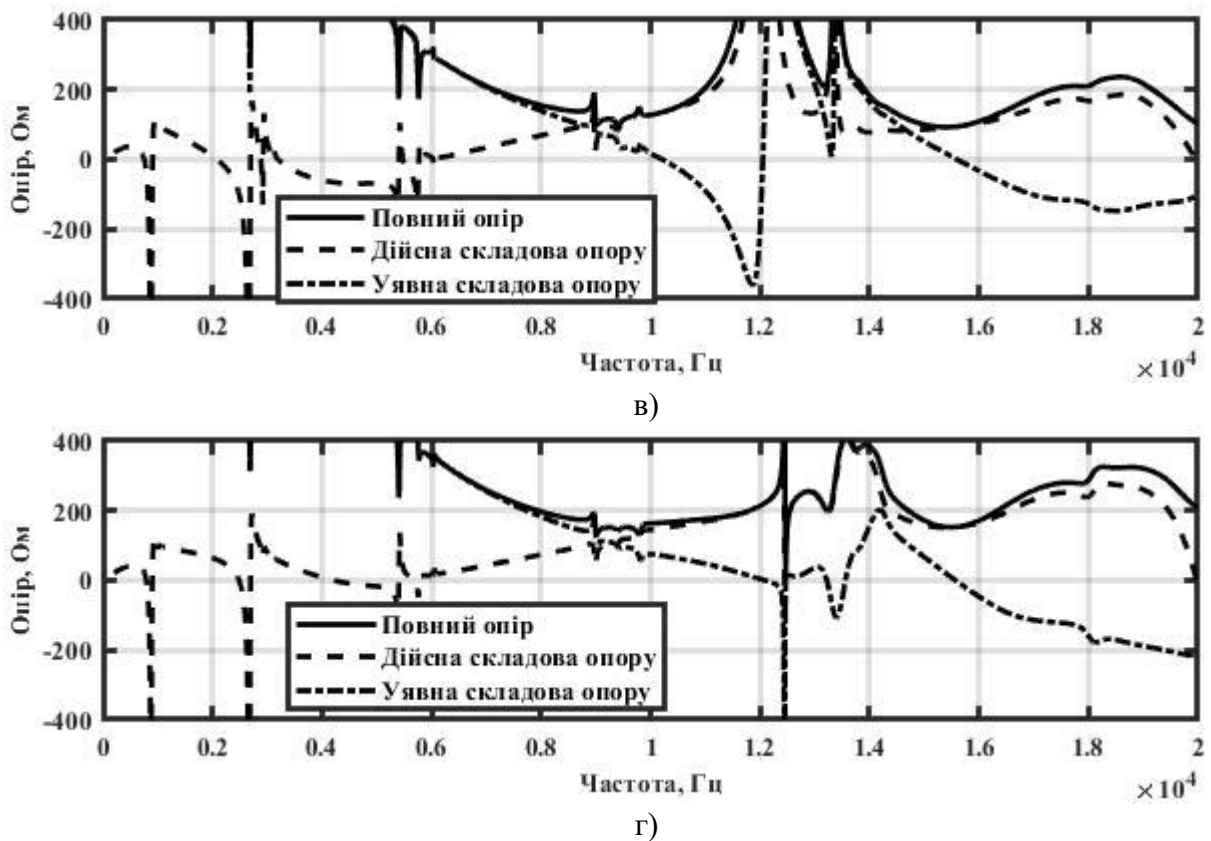


Рис. 4.18 Частотні залежності вхідного електричного опору та його складових середнього (а, в) та крайніх (б, г) випромінювачів із п'єзокераміки складу ЦТС-19 (а, б) та ТБК-3 (в, г) кругової антени з екраном при секторному випромінненні.

Дослідимо тепер, як впливає зміна складу п'єзокераміки активного елемента випромінювача на шукані їх характеристики у складі кругової антени з екраном при її секторному випромінненні. Аналіз кривих рис. 4.6, 4.7, 4.17 та 4.18 дозволяє встановити наступне. Як і при круговому випромінненні, найбільший вплив на механічні коливання випромінювача має місце при складі п'єзокераміки ЦТБС-3, оскільки при ній амплітуда струму у всьому частотному діапазоні при одній і тій самій збуджуючій напрузі є найбільшою (рис. 4.6 б, в). Криві на рис. 4.6 та 4.16 підтверджують той відомий факт, що п'єзокераміка системи ЦТС є більш ефективною в перетворенні енергії ніж ТБК. При цьому змінюється не тільки амплітуда струму, але і форма його частотної залежності в досліджуваному діапазоні частот. І якщо в низькочастотному діапазоні частот, який є різним для випромінювачів з різним складом п'єзокераміки, форми частотних залежностей для складу ЦТС близькі між собою, за виключенням значень частот сплесків струмів, то в інших частотних областях (рис. 4.6 б, в та 4.17 а, б) Вони суттєво відрізняються

між собою. Така залежність має місце і при зміні в випромінювачах складу п'єзокераміки з ЦТС на ТБК (рис. 4.17 в, г). Все наведене має відношення виключно до повного та динамічного струмів. Ємнісний струм має у всіх випадках лінійно зростаючу з частотою залежність. Зі складом п'єзокераміки змінюється лише кут нахилу цієї лінійної залежності.

Аналіз частотних залежностей вхідних електричних опорів випромінювачів при секторному випроміненні кругової антени з екраном (рис. 4.7 та 4.18) свідчить про їх суттєві зміни при зміні складу п'єзокераміки. Ці зміни торкаються не тільки значень амплітуди опору, але й характеру його поведінки в різних діапазонах частот, особливо активної його складової. При цьому в останньому випадку суттєве значення набуває і місце розміщення випромінювачів в секторі випромінення. Зокрема, в низькочастотній області для складів типу ЦТС-19 та ТБК-3 (рис. 4.18) від'ємні значення активних вхідних опорів мають більші величини, ніж при складі ЦТБС-3 (рис. 4.7). Це свідчить про більшу ефективність поглинання випромінювачами акустичної енергії із оточуючого середовища і перетворення її в енергію електричного поля. В резонансній же області при всіх складах п'єзокераміки випромінювачі мають позитивний активний електричний вхідний опір. Реактивний опір для випромінювачів зі складом п'єзокераміки ЦТС набуває в цій області індуктивного характеру, а при зміні її на п'єзокераміку типу ТБК стає більш складним, в одній частотній області індуктивним а в іншій – ємнісним (рис. 4.17 в, г). Значні зміни набуває активний вхідний опір випромінювачів в залежності від складу п'єзокераміки в високочастотній області. Так, якщо для п'єзокераміки ЦТБС-3 (рис. 4.7 б, в) та ТБК-3 (рис. 4.18 в, г) він є позитивним і не змінює свого характеру, то для п'єзокераміки складу ЦТС-19 він, навпаки, набуває від'ємних значень, які також мало змінюються при зміні місця розташування випромінювача в секторі випромінення антени.

Таким чином, підводячи підсумки впливу такого чинника конструкції випромінювача як склад його п'єзокераміки на його електричне поле, можна констатувати, що вибором цього параметру при побудові конструкції

випромінювача можна керувати характеристиками його електричного поля в різних частотних діапазонах і з різною ефективністю по кінцевому результату.

Ще однією із характеристик, яку слід віднести до тих, що характеризують конструкцію досліджуваної антени, є вид поляризації активного елемента випромінювача. До цього часу характеристики електричних полів випромінювачів досліджувалися для випадку їх окружної поляризації. Розглянемо тепер, як вони змінюються при зміні поляризації з окружної на радіальну.

Аналіз кривих рис. 4.19 та 4.20 свідчить про те, що встановлені раніше закономірності поведінки повного електричного струму та його складових для випромінювачів силової конструкції зберігаються і при радіальній поляризації їх п'єзокераміки. Дійсно, повний струм у всьому частотному діапазоні визначається його динамічною складовою.

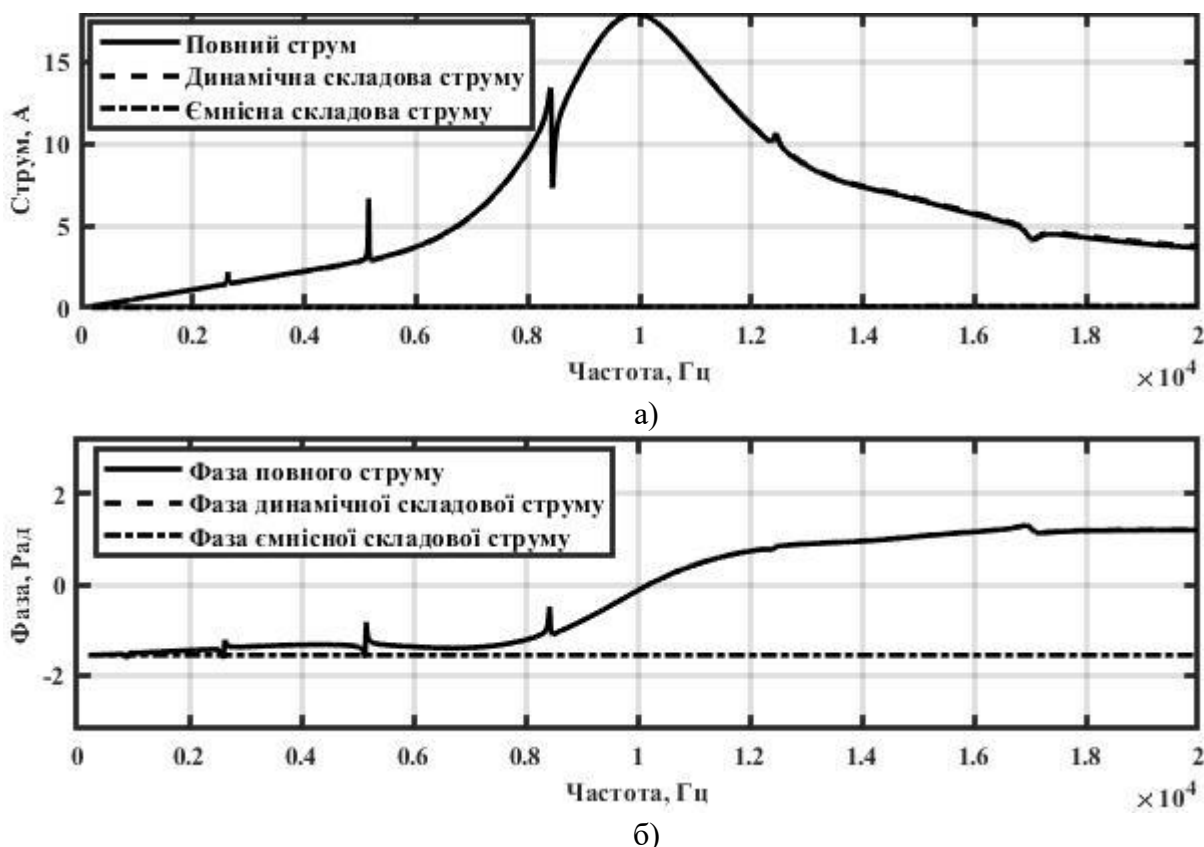


Рис. 4.19 Частотні залежності амплітуд (а) та фаз (б) електричного струму в зовнішніх ланках силових випромінювачів з радіальною поляризацією при круговому випромінненні антен з екраном.

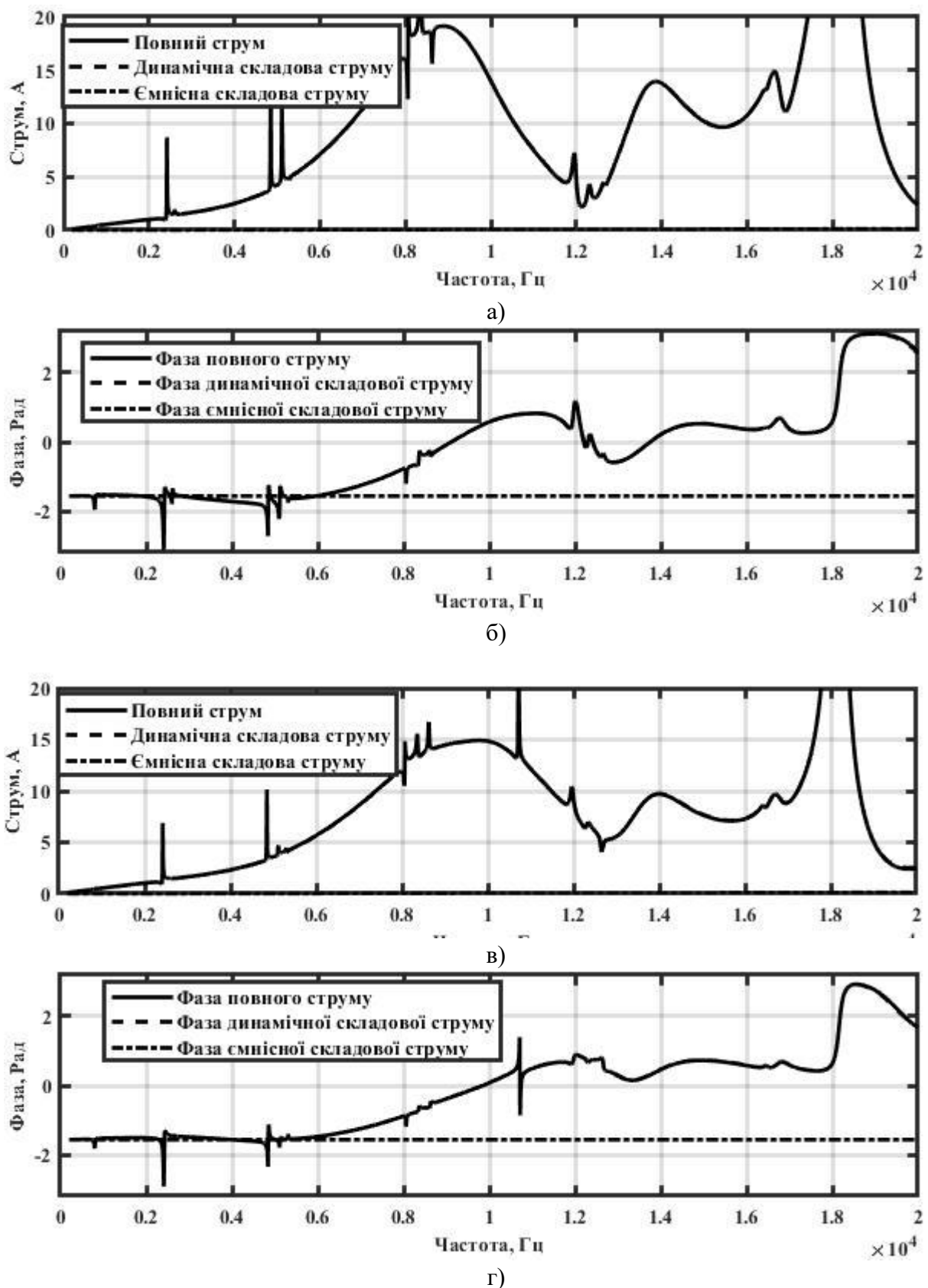


Рис. 4.20 Частотні залежності амплітуд (а, в) та фаз (б, г) електричного струму в зовнішніх ланках центрального (а, б) та крайніх (в, г) силових випромінювачів з радіальною поляризацією при секторному випромінненні кругової антени з екраном.

При круговому випромінненні (рис. 4.19) зміна поляризації обумовлює невелике збільшення основної резонансної частоти оболонки випромінювача і суттєву зміну частоти додаткових викидів амплітуд і фаз. Як і раніше, ці викиди мають місце у всіх частотних областях.

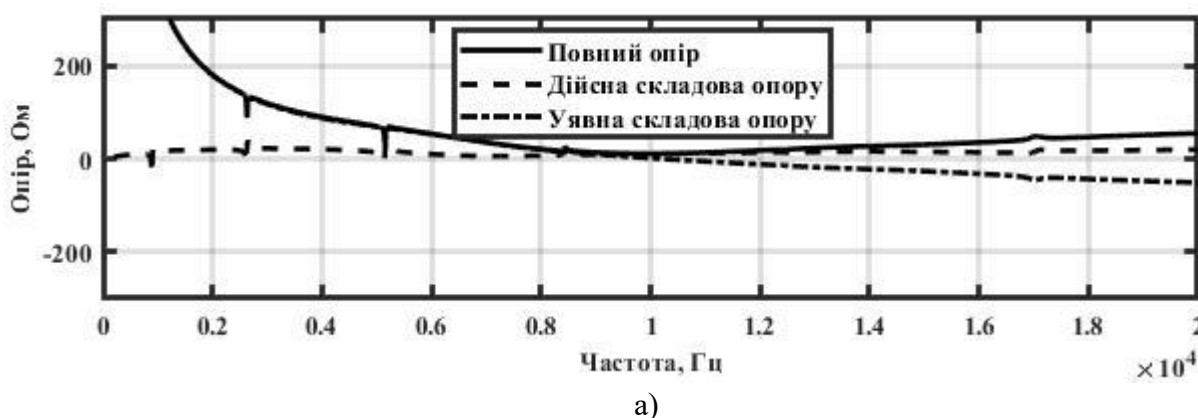
При переході до секторного випроміннення кругової антени з екраном (рис. 4.20) частотні залежності амплітуд і фаз суттєво змінюються як порівняно із круговим випромінненням (рис. 4.19), так і порівняно з випромінювачами з різним місцем розташування їх в секторі випроміннення. При цьому частота власного резонансу п'єзокерамічних оболонок середніх випромінювачів (рис. 4.20 а, б) значно знижуються порівняно як із одиночним, так і з крайнім випромінювачем в секторі випроміннення (рис. 4.20 в, г). До речі, так ж ситуація мала місце і для випромінювачів з окружною поляризацією (рис. 4.4). В трьохелементній антені різниця між частотами власних резонансів оболонок випромінювачів у складі антени досягає по електричному полю близько 10 % від частоти резонансу одиночного випромінювача. Це суттєво ускладнює вибір частоти збудження випромінювачів кругової антени з екраном та секторним випромінненням, при якій забезпечується її максимальна енергетична ефективність.

Перехід до секторного випроміннення суттєво змінює частотні залежності струмів випромінювачів у всіх частотних областях (рис. 4.20). В низькочастотній області збільшується кількість та амплітуди резонансних викидів струму. В резонансній області збільшується кількість резонансних частот струмів та зростають амплітуди нерезонансних викидів струмів. Названі характеристики є різними для середніх і крайніх випромінювачів в секторі антени. В високочастотній області частотні залежності повністю відрізняються від таких же для кругового випроміннення досліджуваної антени і майже не відрізняються між собою для середніх і крайніх випромінювачів в секторі.

Аналіз частотних залежностей вхідних електричних опорів випромінювачів силової конструкції з радіальною поляризацією активних елементів (рис. 4.21) та співставлення їх з такими ж характеристиками випромінювачів з окружною поляризацією п'єзокераміки (рис. 4.5) дозволяє зробити висновок про суттєву

різницю між ними. По-перше, числові значення вхідних електричних опорів випромінювачів та їх складових при всіх режимах випромінення при радіальній поляризації у всьому частотному діапазоні мають в кілька разів більші величини. Особливо це стосується низькочастотної та високочастотної областей. Кількість областей з від'ємними значеннями активних електричних опорів збільшується, а частотні діапазони їх прояву – розширюються. При круговому випроміненні реактивні складові випромінювачів мають близький характер поведінки своїх частотних залежностей при обох типах поляризації. В той самий час при секторному випроміненні частотні залежності реактивного вхідного опору випромінювачів при радіальній поляризації суттєво ускладнюються. Ці ускладнення полягають не тільки в значному ускладненні форми частотних залежностей реактивності вхідного електричного опору, а і в появі діапазонів частот, особливо для середніх випромінювачів робочих секторів антени, де характер реактивності змінюється на протилежний (рис. 4.21 б).

Підводячи узагальнюючий висновок, можна стверджувати, що застосування в випромінювачах силової конструкції в кругових антенах з екраном п'єзокераміки з радіальною поляризацією більш негативно впливає на енергетичну ефективність досліджуваних антен та суттєво ускладнює їх узгодження з генераторними пристроями трактів випромінення гідроакустичних станцій, ніж при використанні п'єзокераміки з окружною поляризацією.





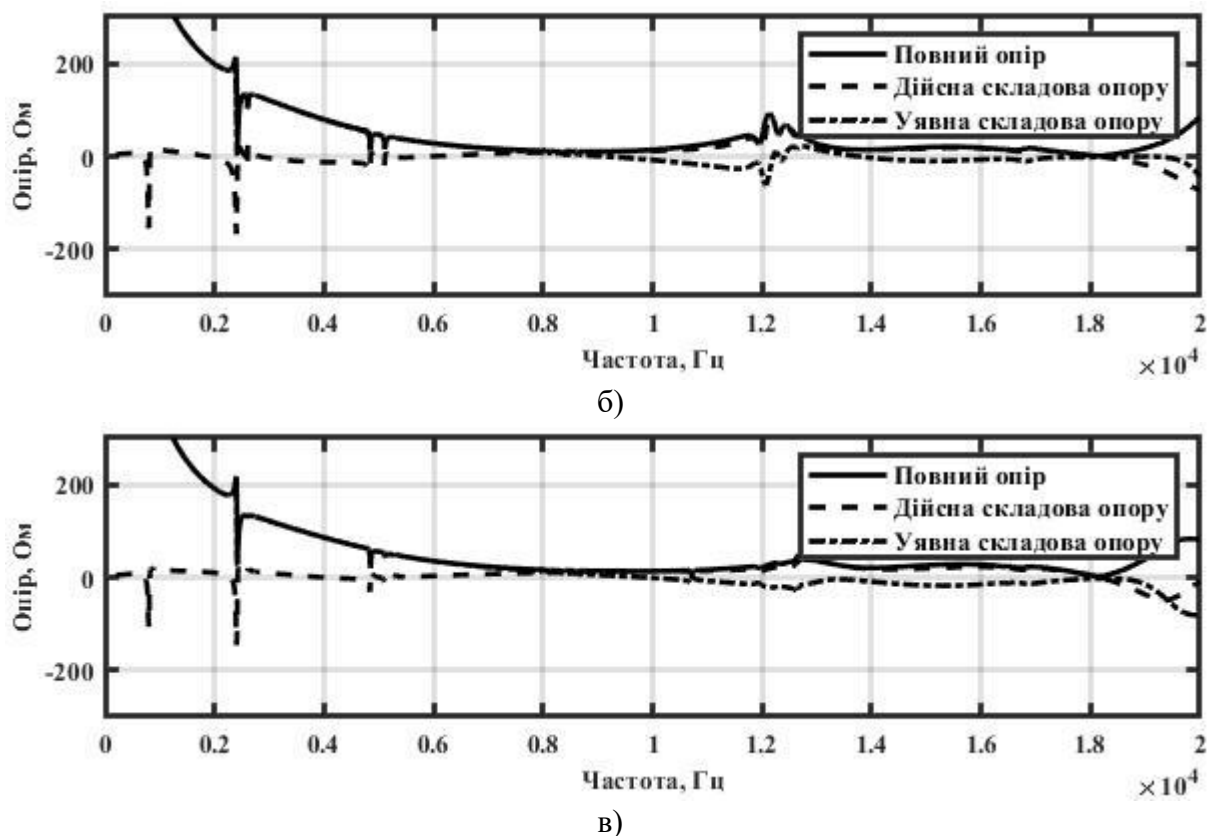
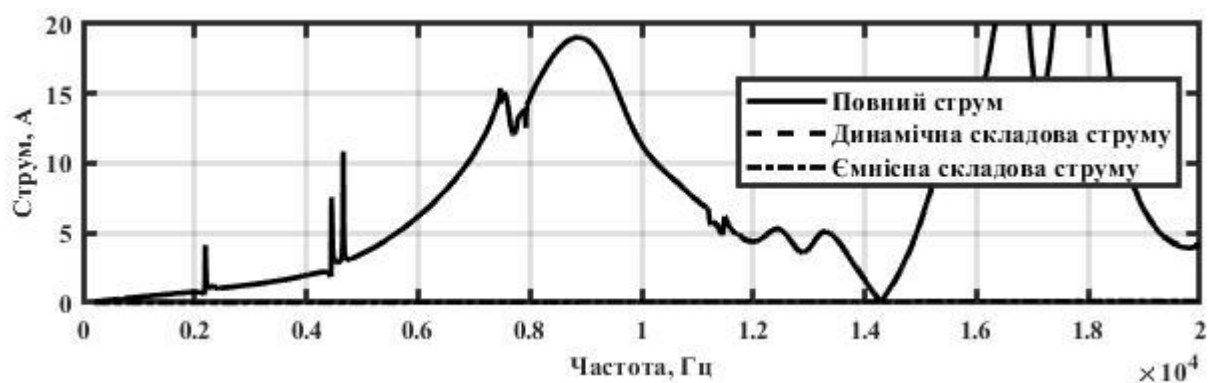


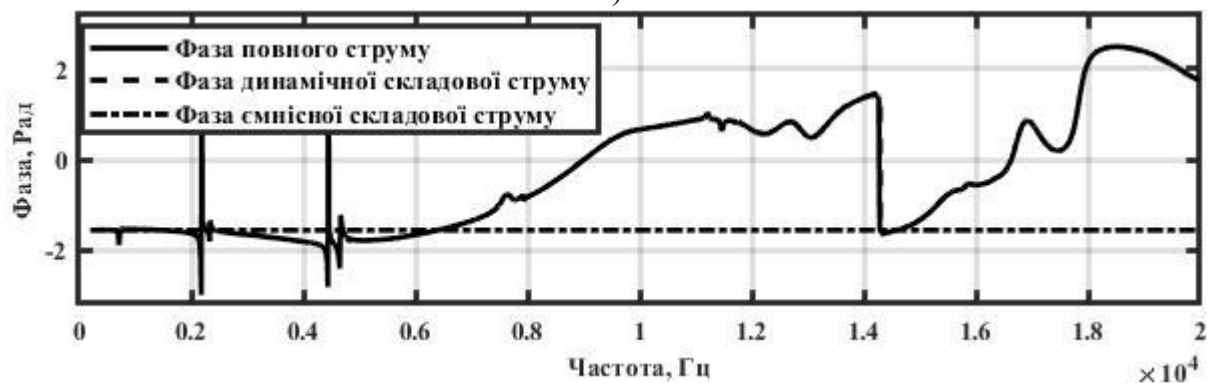
Рис. 4.21 Частотні залежності повного вхідного електричного опору, його активної та реактивної складових силових випромінювачів з радіальною поляризацією при круговому (а) та секторному (б, в) випромінненні кругової антени з екраном.

Розглянемо тепер, як впливає зміна поляризації п'єзокераміки випромінювачів з окружної на радіальну при побудові кругових антен з екраном із випромінювачів компенсованої конструкції, зокрема водозаповнених.

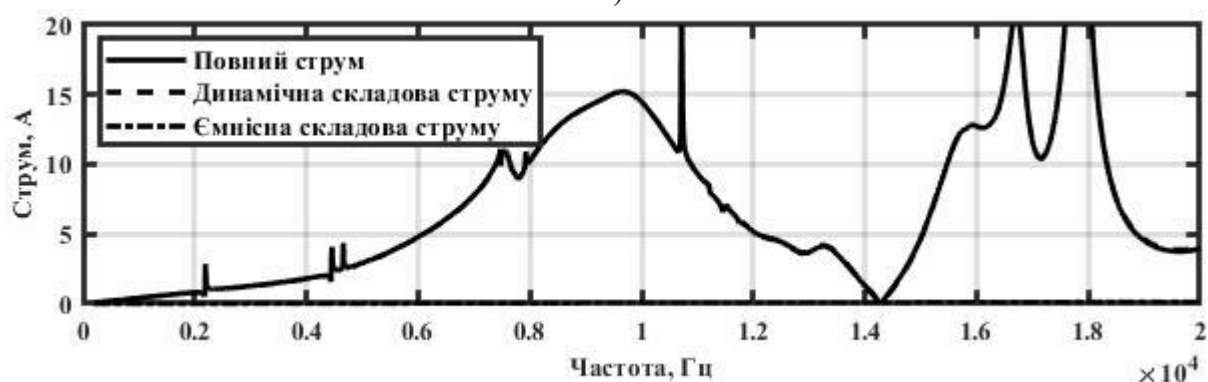
Аналіз графіків рис. 4.22 і співставлення їх з графіками рис. 4.21 і рис. 4.8 відповідно для силових конструкцій випромінювачів з радіальною поляризацією і компенсованих конструкцій випромінювачів з окружною поляризацією дозволяє встановити наступне. При переході в антенах від випромінювачів силової конструкції до компенсованих загальна поведінка частотних залежностей амплітуд і фаз в низькочастотній та резонансній областях в цілому



а)

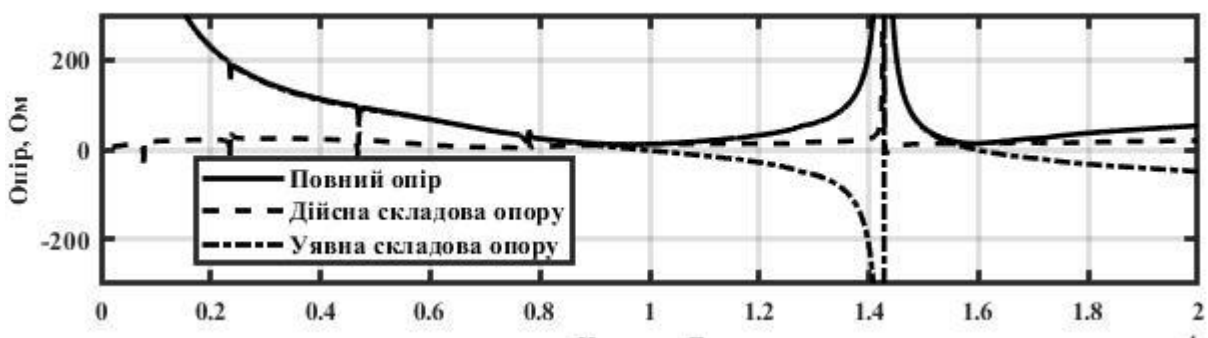


б)



в)

Рис. 4.22 Частотні залежності амплітуд (а, в) та фаз (б) електричних струмів в зовнішніх ланках центрального (а, б) та крайніх (в) випромінювачів з радіальною поляризацією при секторному випромінненні кругової антени з екраном



а)

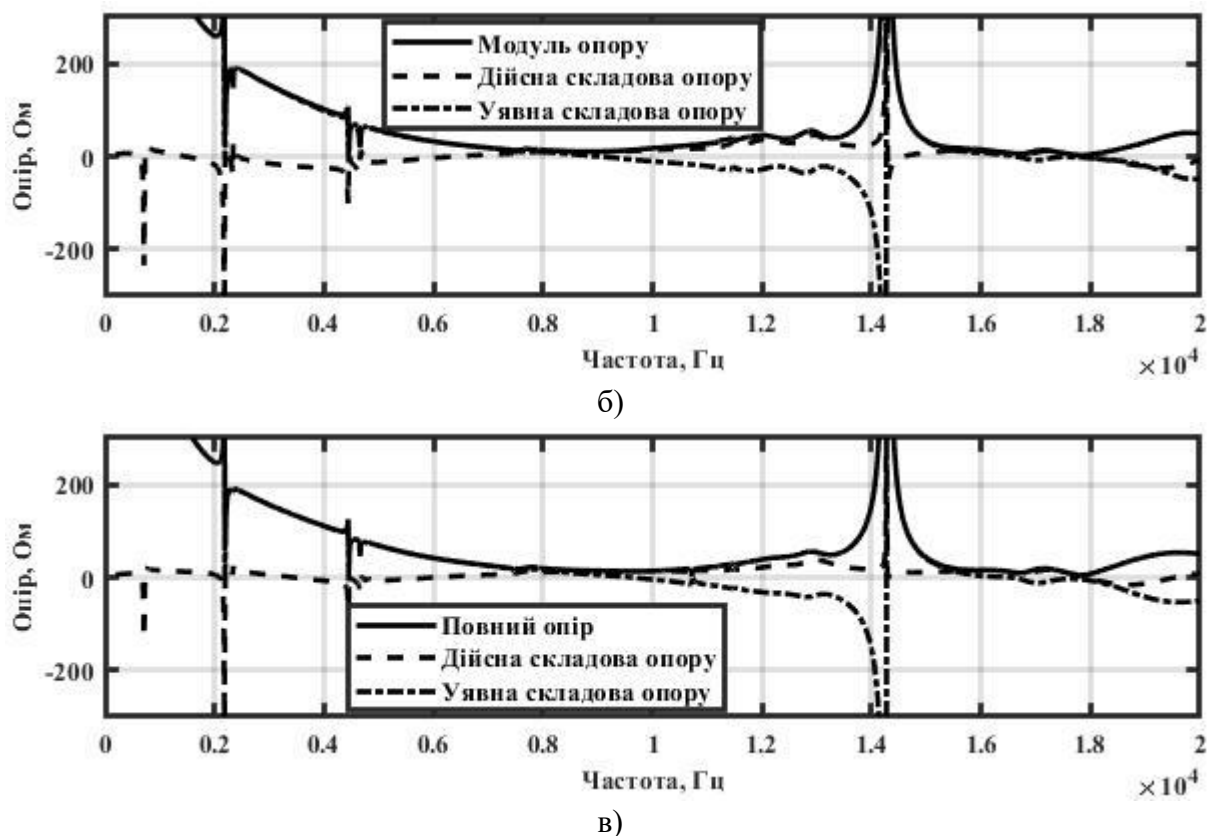


Рис. 4.23 Частотні властивості повного вхідного електричного опору та його реактивної і активної складових компенсованих випромінювачів з радіальною поляризацією при круговому (а) та секторному (б, в) випромінненні кругової антени з екраном.

зберігаються. Зміни мають місце в фазочастотних залежностях і полягають в тому, що амплітудні викиди струму в області низьких частот мають резонансний характер (рис. 4.22 б). В високочастотній області частотні залежності амплітуд і фаз компенсованих випромінювачів з радіальною поляризацією набувають характеру поведінки як у компенсованих випромінювачів з окружною поляризацією (рис. 4.8). Відмінність полягає в значному зменшенні кількісних значень амплітуд струмів.

Аналіз частотних залежностей вхідних електричних опорів компенсованих випромінювачів з радіальною поляризацією у складі кругової антени з екраном (рис. 4.23) свідчить про те, що в області низьких і резонансних частот їх поведінка близька до поведінки силових випромінювачів з радіальною поляризацією (рис. 4.21), а в області високих частот – до поведінки компенсованих випромінювачів з окружною поляризацією (рис. 4.9). Різниця полягає в значному збільшенні кількісних значень всіх опорів при радіальній поляризації.

Таким чином, і при використанні в кругових антенах з екраном випромінювачів компенсованої конструкції з радіальною поляризацією їх активних елементів має місце можливість значної втрати енергетичної ефективності антен і складність узгодження входних опорів збуджуючих генераторів з входними електричними опором випромінювачів антен.

#### **4.5 Властивості електричних полів кругових гідроакустичних антен з екранами в залежності від конструктивних розмірів антени**

До цього часу всі дослідження властивостей електричних полів виконувалися для кругових антен з екранами при умові незмінної кількості випромінювачів в них та сталій відстані між елементами антенних решіток. Дослідимо тепер, як будуть змінюватися електричні поля випромінювачів в кругових антенах з екраном при зміні кількості випромінювачів в них. Розрахунки частотних залежностей струмів та опорів виконувалися для випромінювачів з п'єзокераміки складу ЦТБС-3 та окружною поляризацією, параметрів випромінювачів, які наведені в розділі 4.1 і кількості випромінювачів  $N = 4$  і  $5$ .

Аналіз частотних залежностей амплітуд і фаз струмів випромінювачів силової конструкції (рис. 4.24, 4.25 та 4.26) свідчить про наступне. В режимі кругового випромінювання (рис. 4.3 і 4.24) в низькочастотній та високочастотній областях частотні залежності струмів при збільшенні кількості випромінювачів мало відрізняються між собою як за амплітудою, так і за фазою. В той самий час в резонансній області ці змін дуже значні і полягають в повному роздвоєнні резонансної кривої п'єзокерамічної оболонки випромінювачів з провалом на її резонансній частоті.

При переході до режиму секторного випромінювання (рис. 4.25) зміна кількості випромінювачів в антені значно змінює частотні залежності струмів випромінювачів. Ці зміни відбуваються у всіх частотних областях і в значній мірі залежать від місця розташування випромінювачів в секторі. В низькочастотній області у центральних випромінювачів (рис. 4.25 а, б), при  $N = 4$  зростає кількість амплітудних сплесків, частина з них приймає резонансний характер. Ці сплески зосереджуються навколо частот додаткових резонансів механічних полів

випромінювачів (рис. 4.4 а і 4.25 а), так ж сама ситуація має місце і у крайніх (рис. 4.4 б і 4.25 в) випромінювачів в цій області. В той самий час при збільшенні кількості випромінювачів в антен в низькочастотній області рівні викидів амплітуд струмів зменшуються, причому ці зменшення характерні для всіх випромінювачів в секторі.

В резонансній області збільшення кількості випромінювачів в секторі обумовлює значні зміни частотних залежностей струмів (рис. 4.4 і 4.25) у всіх випромінювачів. Вони приймають дуже нерівномірний характер, резонансні смуги їх дуже звужуються, а самі резонансні частоти стають близькими до значень частот основного резонансу п'єзокерамічних оболонок випромінювачів. Форми частотних залежностей дуже відрізняються для середніх і крайніх випромінювачів в секторі.

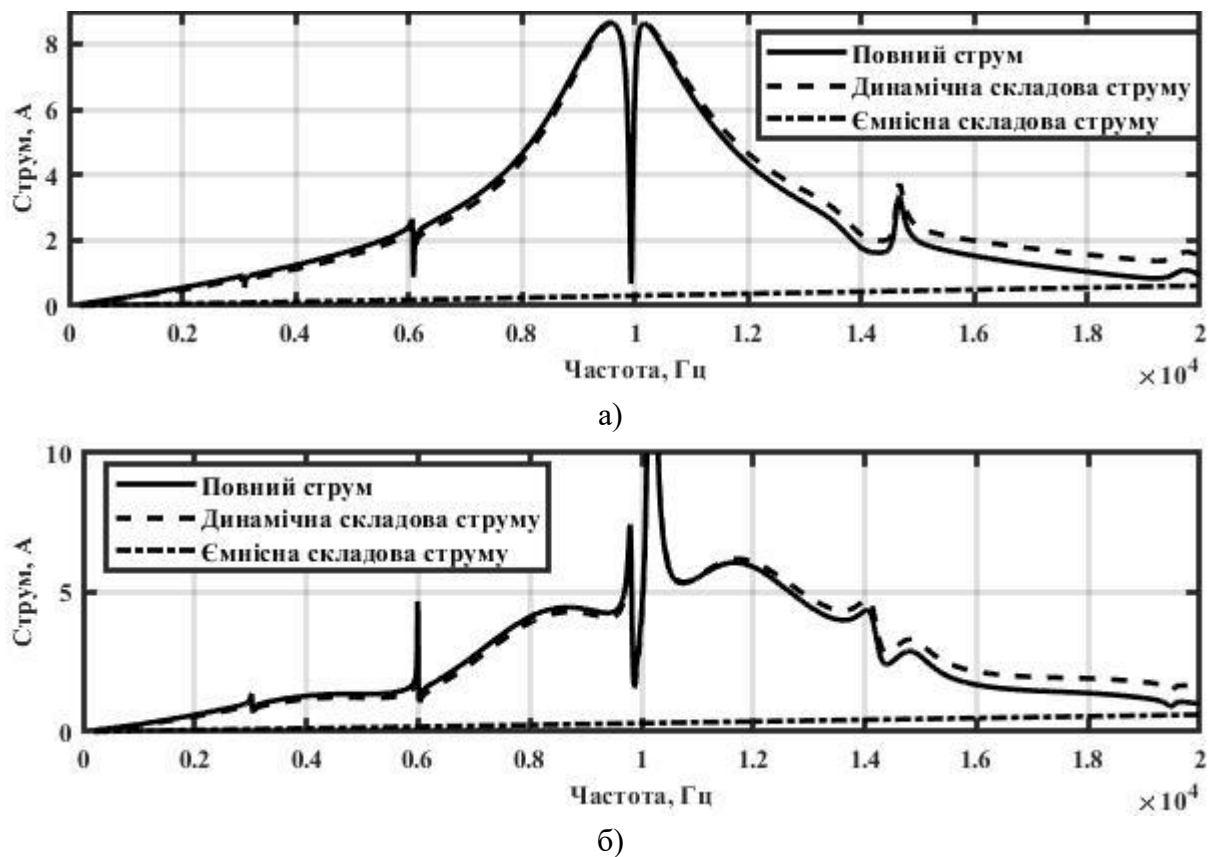
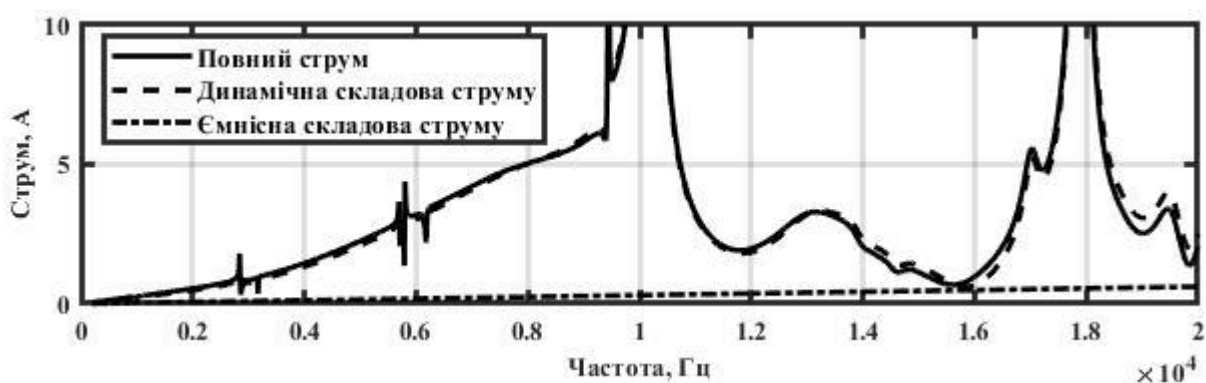


Рис. 4.24 Частотні залежності амплітуд струмів випромінювачів п'ятиелементної (а) та шестиелементної кругових антен з екраном при круговому випромінненні.

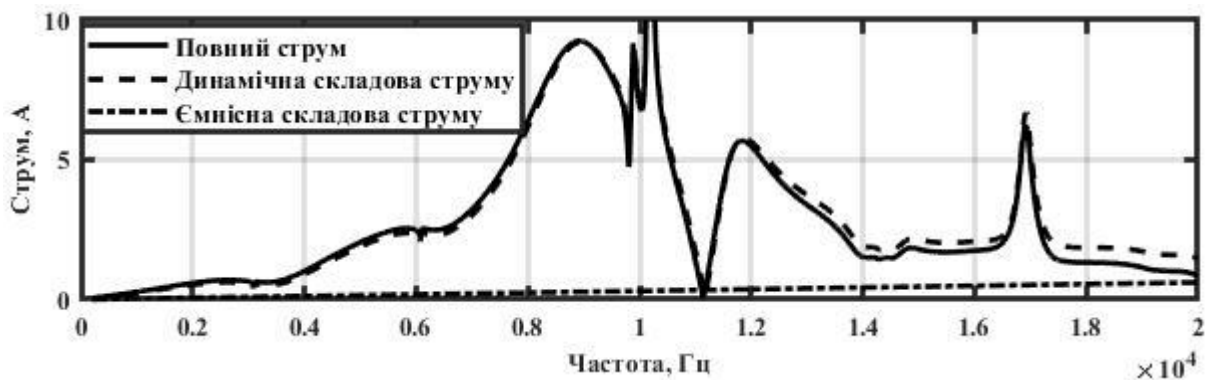
В високочастотній області характер поведінки частотних залежностей амплітуд (рис. 4.4 і 4.25) дуже сильно залежить від кількості випромінювачів в секторі. При п'яти випромінювачах форми частотних залежностей всіх випромінювачів суттєво згладжуються, причому у крайніх випромінювачів більше ніж у середніх. В той же

час їх фазочастотні залежності дуже змінюються, особливо для крайніх випромінювачів, перетинаючи при цьому кілька разів частотну вісь. Це свідчить про багато резонансний характер струмів в цій області.

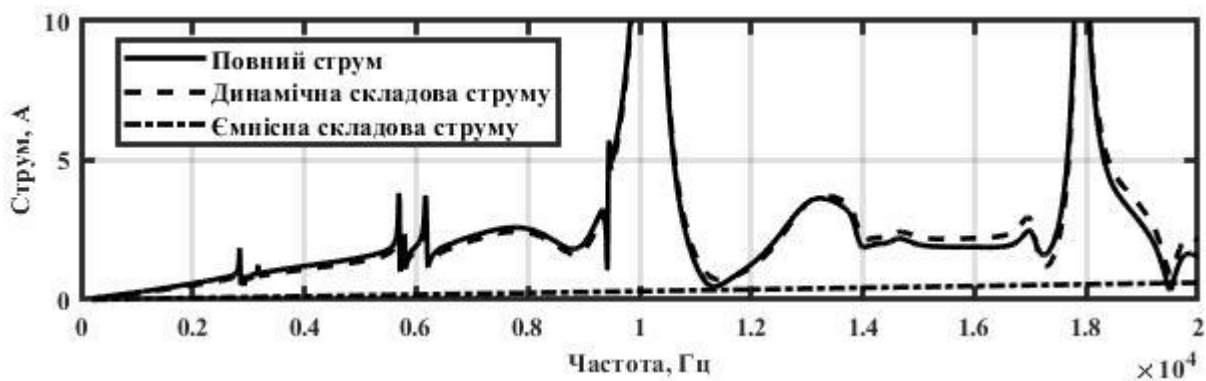
Характеризуючи в цілому ж частотні залежності струмів випромінювачів зауважимо, що при будь-якій кількості випромінювачів в круговій антені з екраном і різних режимах випромінення у всіх частотних областях повні струми у зовнішніх ланках випромінювачів як по формі, так і по чисельним значенням керуються своїми динамічними складовими. При цьому останні перевищують по амплітуді ємнісну складову повного струму в залежності від області частот на один – два порядки.



а)



б)



в)

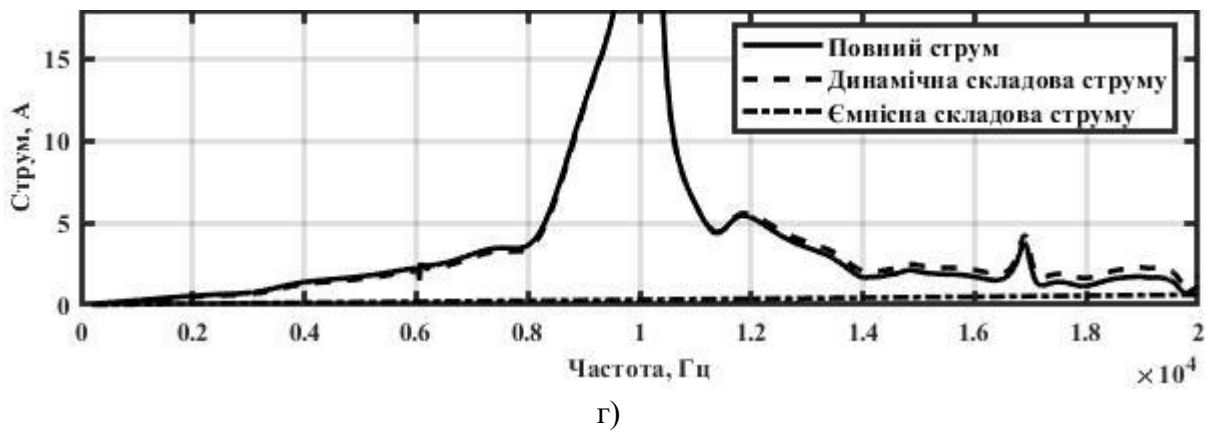
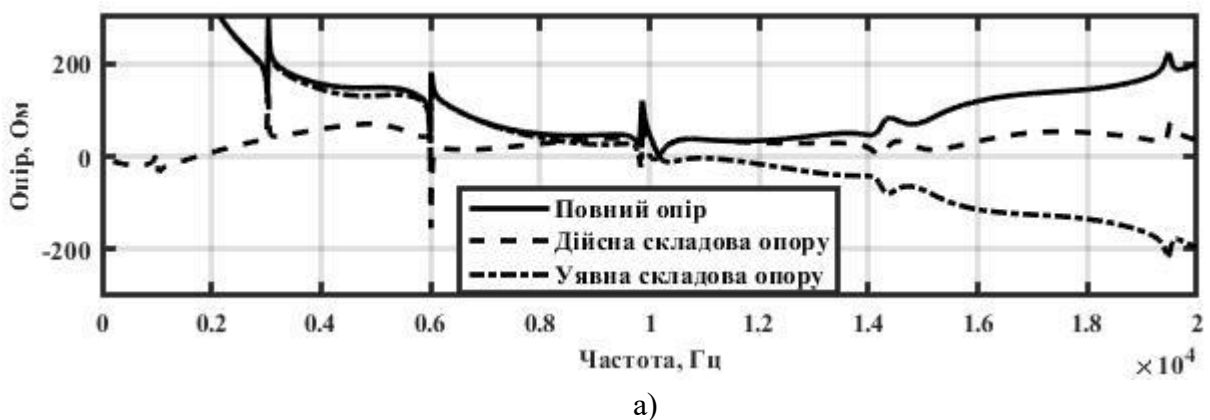
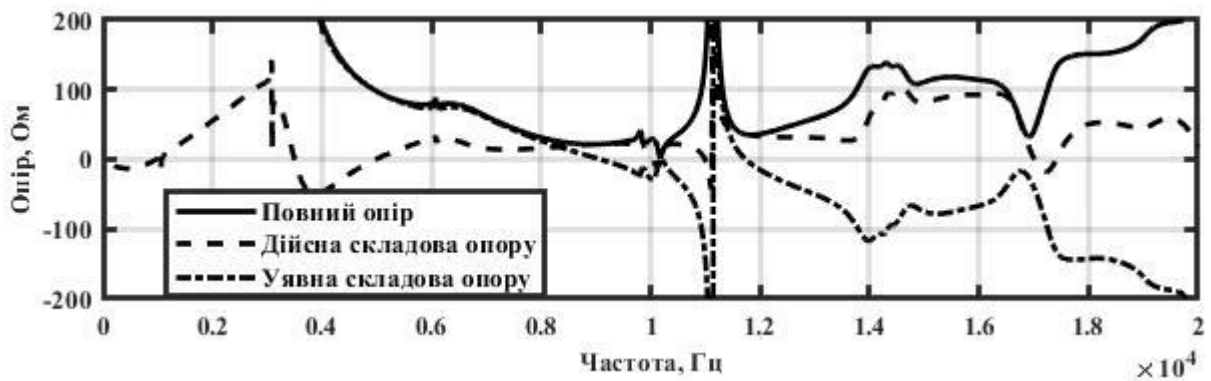


Рис. 4.25 Частотні залежності амплітуд струмів центральних (а, б) та крайніх (в, г) випромінювачів п'ятиелементної (а, в) та шестиелементної (б, г) кругових антен з екраном при секторному випромінненні

Дослідимо тепер, як змінюються в круговій антені з екраном входні електричні опори випромінювачів силової конструкції при збільшенні їх кількості в антені. Аналіз графіків рис. 4.5 та 4.26 свідчить про наступне. Перш за все звертає на себе увагу той факт, що при збільшенні кількості випромінювачів в антені кількість діапазонів частот, де активний вхідний опір приймає від'ємні значення, або зовсім зникає при круговому випромінненні (рис. 4.6 а), або значно зменшується при секторному випромінненні (рис. 4.26 б, в). Реактивні складові близькі для центральних випромінювачів (рис. 4.5 б, 4.26 б) і значно відрізняються між собою для крайніх випромінювачів. В цілому ж узгодження опорів генераторів з опорами крайніх випромінювачів значно є більш складним.



а)



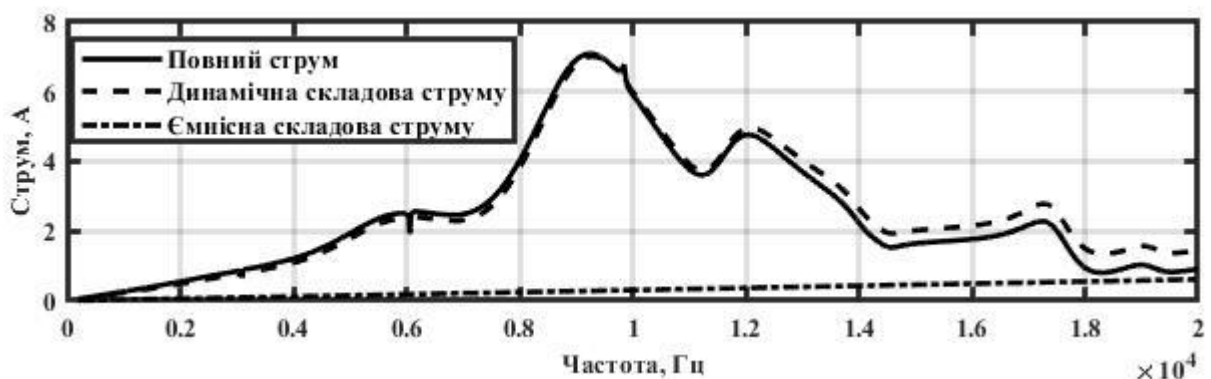
б)



в)

Рис. 4.26 Частотні залежності повного вхідного електричного опору та його складових силових випромінювачів шестиелементної кругової антени з екраном при круговому (а) та секторному (б, в) випромінненні для центрального (б) і крайніх випромінювачів.

При дослідженні і механічних і акустичних полів біли визначені закономірності їх зміни в залежності від зміни ще одного конструктивного параметра кругових антен з екраном, а саме, відстаней між елементами антени. Встановимо тепер такі залежності для електричних полів досліджуваних антен.



а)



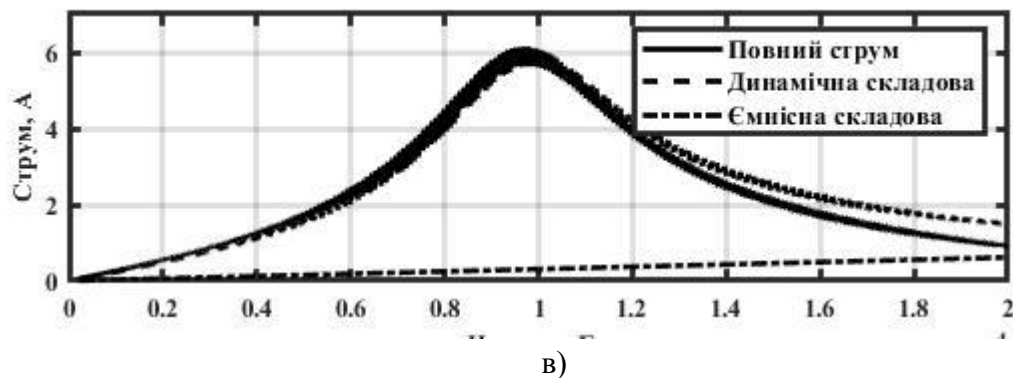
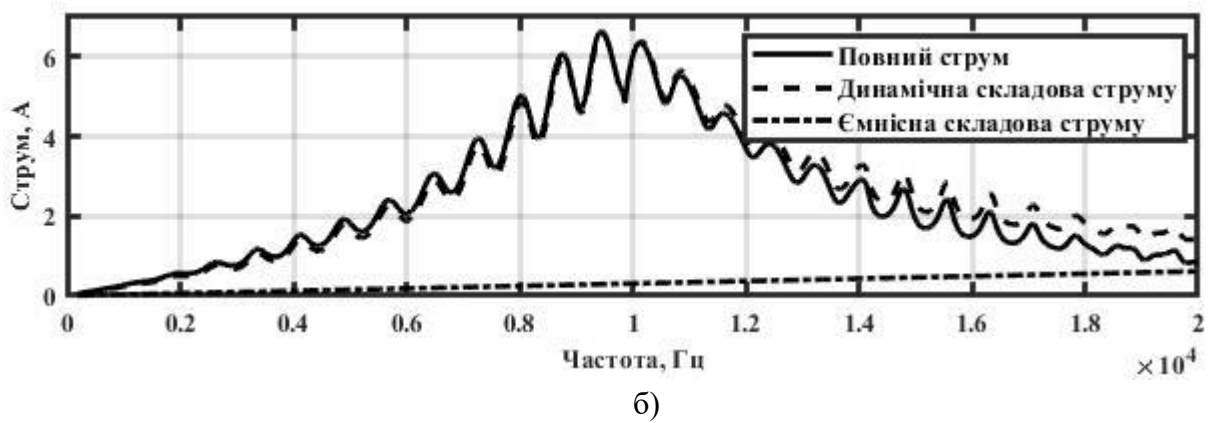
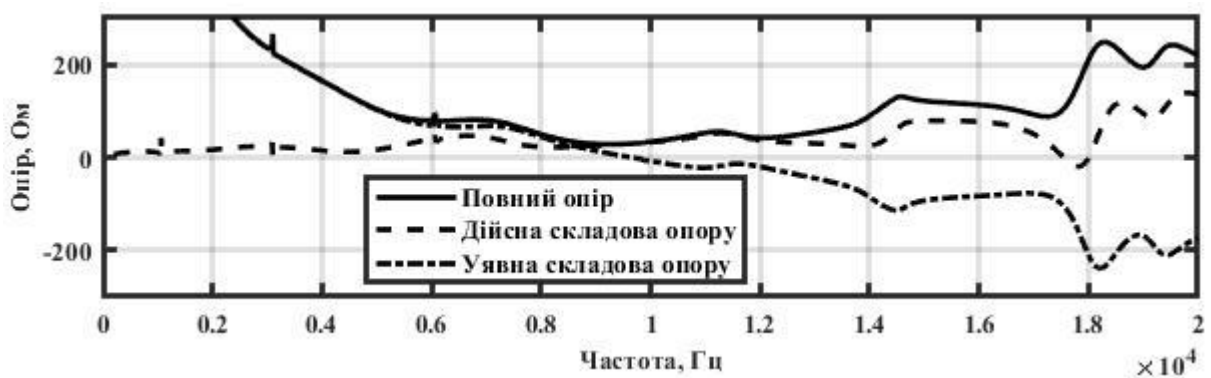


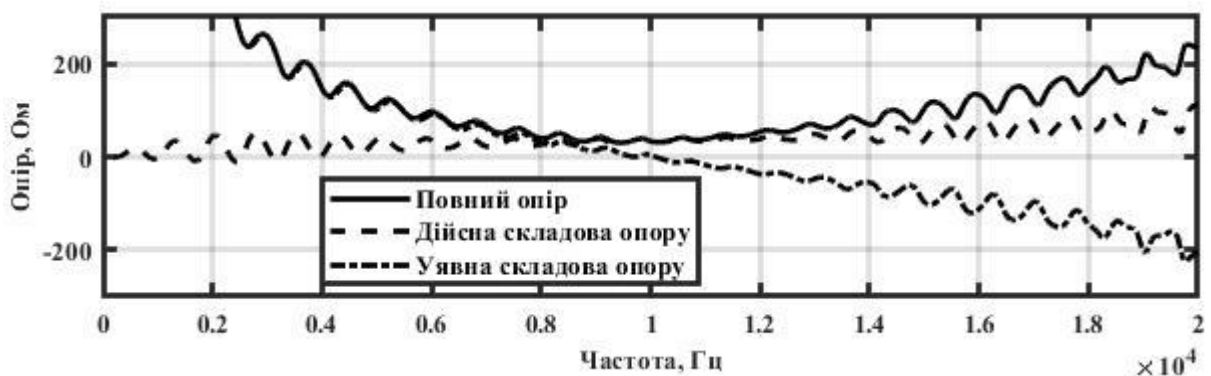
Рис. 4.27 Частотні залежності амплітуд електричного струму у зовнішніх ланках силових випромінювачів антени з екраном при круговому випромінненні і відстанями між поверхнями випромінювачів і поверхнею екрана відповідно 0,1 м (а), 1 м (б) та 10 м (в).

Аналіз кривих на рис. 4.3 і 4.27 дозволяє визначити закономірності зміни електричного струму антени. Як і прогнозувалося, ємнісний струм не залежить від зміни відстані і є однаковим для конструкцій антен з різними відстанями між їх елементами. Такою ж стабільністю відзначається керованість повного струму його динамічною складовою. Але їх форма зазнає істотних змін при зміні відстаней між  $r_{0N+1}$  і  $r_{0S}$ . Загальним напрямком цих змін є прямування форми частотної залежності як амплітуд, так і фаз струмів випромінювачів у складі досліджуваної антени до форми таких же залежностей одиночного випромінювача. При цьому хвилястість досліджуваних характеристик та амплітуди цієї хвилястості свідчать про кількісний вплив, випромінених і багатократно відбитих елементами антени хвиль, на електричні поля їх випромінювачів. При відносно малих відстанях (рис. 4.3 і 4.27 а) ця хвилястість мала, але амплітуди її великі. При подальшому збільшенні відстаней (рис. 4.27 б) в кількісному відношенні хвилястість значно зростає, а амплітуди хвиль суттєво зменшуються. І, нарешті, при великих відстанях (рис. 4.27 в) хвилястість

перетворюється в «бахрому». При цьому в останніх двох випадках усереднені форми частотних залежностей амплітуд і фаз співпадають як між собою, так і з формами частотних залежностей одиночних випромінювачів. Збільшення хвилястості і зменшення її амплітуд обумовлено тим, що кількість відбитими елементами антен хвиль зростає, а різниця амплітуд і фаз між ними хоча і існує, але стає дедалі меншою. Таким чином, вплив обміну акустичною енергією між елементами кругової антени з екраном на електричні поля її випромінювачів при збільшенні відстані між елементами антени зменшується і зникає зовсім при великих відстанях. При цьому відсутність хвилеподібності струму на низьких частотах у всіх випромінювачів обумовлена тим, що на цих частотах їх власний механічний імпеданс дуже швидко зростає зі зниженням частоти, в той самий час імпеданс випромінювання спадає. Тому відбиті хвилі малі і вплив обміну акустичною енергією на поля випромінювачів в антені дуже малий. В високочастотній області також має місце зростання власного механічного імпедансу, але при цьому вплив акустичної взаємодії більш значний, ніж на низьких частотах. Тому хвилястість залежностей існує, хоча і не така, як в резонансній області.



а)



б)

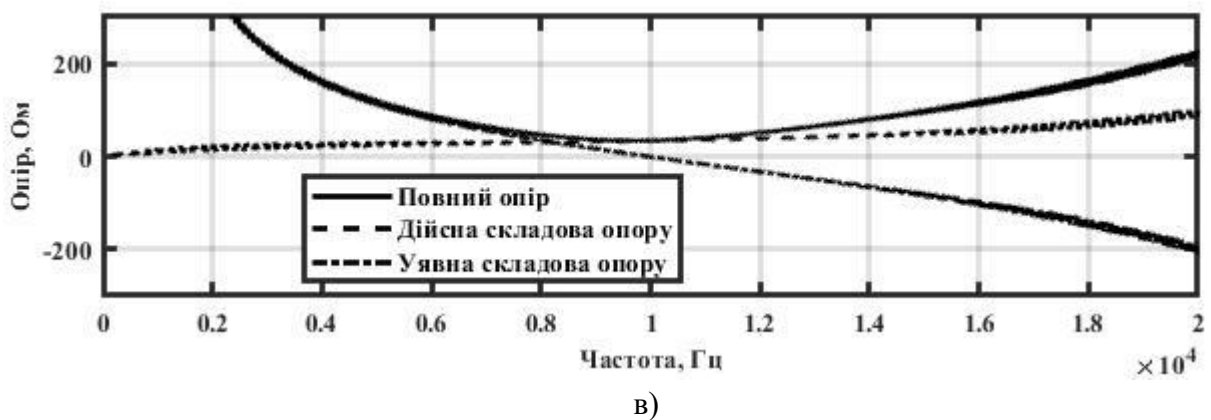


Рис. 4.28 Частотні залежності повного електричного опору випромінювачів та його складових при круговому випромінненні кругової антени з екраном і відстанях між поверхнями випромінювачів і поверхнею екрана відповідно 0,1 м (а), 1 м (б) та 10 м (в).

Встановлені закономірності поведінки електричного струму збудження випромінювачів у складі антени з екраном впливають і на закономірності змін з частотою їх вхідних електричних опорів. Аналіз кривих на рис. 4.5 і 4.28 показує, що повний вхідний електричний опір і всі його складові мають характер, хвилеподібність якого збільшується при збільшенні відстані між елементами антени, переростаючи в «бахрому» на великих відстанях (рис. 4.28 в). НА цих великих відстанях всі електричні опори випромінювачів у складі антени з екраном і поза нею мають близький характер залежності від частоти. Цікаво відзначити, що на відміну від частотних залежностей струму (рис. 4.27) хвилеподібність їх по вхідним опорам при збільшенні відстаней зростає в областях низьких та високих частот і майже зникає в області резонансних частот. Крім того, при збільшенні відстаней між елементами антени з екраном від'ємні значення активного опору зменшуються і при певних значеннях відстаней повністю зникають.

## Висновки до розділу 4

Методом чисельного експерименту на основі аналітичних співвідношень, які біли отримані в розділі 1, та систематизованого аналізу отриманих числових результатів визначені закономірності поведінки ряду характеристик електричних полів випромінювачів кругових циліндричних антен з екраном в залежності від особливостей виконання їх конструкцій. До них відносяться: тип виконання конструкції випромінювачів; вид речовини, яка заповнює внутрішнє середовище випромінювача; склад п'єзокераміки активного елемента випромінювача та характер

її поляризації; геометричні розміри акустичного екрана та антени; кількість випромінювачів в антені; характер організації електричного збудження випромінювачів. В якості досліджуваних параметрів електричних полів прийняті частотні залежності амплітуд та фаз електричних струмів збудження випромінювачів та величини вхідних електричних опорів випромінювачів та їх активних і реактивних складових.

Встановлено, що при всіх режимах збудження випромінювачів повні електричні струми та їх вхідні електричні опори відрізняються як між собою, так і від одиночного випромінювача. При цьому ємнісна складова повного струму змінюється лінійно з частотою, а динамічна складова має складні залежності. Ці залежності суттєво залежать від місця розташування випромінювачів в секторі випромінювання кругової антени з екраном та антени в цілому, типу конструктивного виконання випромінювачів – силового або компенсованого та фізичних параметрів речовини що заповнює внутрішні порожнини циліндричних випромінювачів.

Встановлено, що повний струм збудження випромінювачів керується його динамічною складовою у всьому діапазоні досліджуваних частот. Показано, що на певних частотах, які відповідають частотам додаткових резонансів механічних і акустичних полів, в частотних залежностях амплітуд і фаз електричних струмів виникають певні сплески їх величини.

Встановлено, що на характеристики електричних струмів випромінювачів у складі кругової антени з екраном значний вплив мають: кількість випромінювачів в антені; розміри екрана та антени; склад п'єзокераміки в випромінювачах та характер її поляризації.

Вперше встановлено, що наявність акустичної взаємодії елементів кругової антени з екраном по зовнішньому середовищу обумовлює появу ряду ефектів, які на перший погляд є парадоксальними. В частотних характеристиках електричних опорів виявлені частоти і навіть діапазони частот, на яких активний опір випромінювачів обнуляється або навіть набуває від'ємних значень. Це свідчить про те, що такі випромінювачі у складі антени, поглинаючи електричну енергію від збуджуючих електричних пристроїв, не випромінюють її в оточуюче середовище.

Більше того, при від'ємних значеннях  $R_s (S=1,...,N)$  випромінювачі переходять в режим поглинання акустичної енергії із оточуючого середовища і перетворення її в електричну. Кількість цих частот і їх значення визначаються характеристиками випромінювачів і антени.

Виявлені ефекти обумовлені появою у складі механічного поля наступних за нульовою мод коливань з амплітудами, близькими до амплітуди нульової моди. Тому, коли на якій-небудь частоті енергія акустичного поля антени перевищує енергію, випроміненого випромінювачем антени на нульовій моді, на якій збуджується цей випромінювач, надлишок енергії закачується в цей випромінювач зовнішнім акустичним полем і перетворюється ним, знову ж таки тільки на нульовій моді в електричну енергію. Такі випромінювачі на цих частотах потрапляють у складне становище по своїй міцності, оскільки забирають енергію і від генератора, і від своїх сусідів по антені.

## **ВИСНОВКИ**

Основні результати дисертаційної роботи можливо сформулювати наступним чином:

1. Вперше запропоновані нові розрахункові моделі кругових циліндричних антенних решіток з екранами, які утворені із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів, що дозволяють в рамках стаціонарної гідроелектропружності при проектуванні решіток врахувати вплив фізичних, механічних та електричних характеристик решіток а їх елементів на формування їх електричних, механічних та акустичних полів.
2. Методом зв'язаних полів в багатозв'язних областях розв'язані наскрізні задачі випромінення гідроакустичних сигналів круговими антенними решітками, які утворені із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів та екрану, з урахуванням зв'язаності електричних, механічних та акустичних полів при перетворенні енергії та багатократного обміну випроміненими та відбитими звуковими хвилями між всіма елементами антенних решіток при формуванні ними акустичних полів в оточуючих середовищах.

3. З використанням одержаних аналітичних співвідношень вперше з єдиних методичних підходів встановлені якісні та кількісні закономірності формування електричних, механічних та акустичних полів решіток та випромінювачів в залежності від характеристик їх конструкцій.

4. При дослідженні механічних полів решіток та випромінювачів вперше встановлені та досліджені їх суттєві зміни, пов'язані із втратою випромінювачами у складі решіток одномодовості механічних полів. Показано, що при радіально симетричному електричному навантаженню випромінювачів і асиметричному акустичному навантаженню їх у складі решіток поява багатомодовості механічних полів випромінювачів обумовлена генерацією в них крім нульової наступних за нею форм механічних коливань і ефективному перерозподілу між всіма модами коливань енергії, що «закачується» в випромінювачі антенної решітки тільки на нульовій моді.

5. При дослідженні акустичних полів антенних решіток вперше встановлено збагачення їх спектру резонансних частот і значне розширення його в області низьких частот. Кількість заново генерованих резонансних частот випромінювання сигналів визначається конструктивними та фізичними характеристиками решіток і випромінювачів. Їх найнижча частота може приймати значення, в (7 – 10) разів нижче порівняно із резонансною частотою одиночного випромінювача при близьких величинах акустичного тиску. Встановлено, що фізичними причинами появи наведених особливостей акустичних полів решіток є надбання механічними полями її випромінювачів у складі решіток властивості багатомодовості.

6. При дослідженні електричних полів вперше встановлені закономірності поведінки параметрів електричних полів в залежності від параметрів решіток та їх елементів. Встановлено частотні діапазони, в яких управління повним струмом збудження випромінювачів здійснюється його ємнісною або динамічною складовими. Визначені умови змін характерів поведінки активного та реактивного складових електричного опору випромінювачів.

Встановлено Кількісний зв'язок між змінами амплітуд нульової моди коливань механічного поля в різних частотних діапазонах і відповідними їм змінам

динамічної складової струму електричного поля. Виявлені умови набуття вхідним активним електричним опором випромінювачів від'ємних значень та їх зв'язок з акустичним полем цих випромінювачів.

7. Адекватність запропонованих моделей реальним круговим антенним решіткам з екраном підтверджена експериментом.

8. Отримані результати мають практичне значення, пов'язане із наступним:

– виявлені умови практичного збільшення енергетичної ефективності кругових антенних решіток з екраном без змін їх розмірів і характеру електричного збудження шляхом використання резонансного випромінювання сигналів в збагаченому низькочастотному спектрі власних частот решітки;

– створення можливостей раціонального вибору побудови конструкцій кругових антен з екраном, при їх проектуванні шляхом розрахунку параметрів варіантів антен при різних значеннях геометричних, фізичних механічних та електричних характеристик утворюючих антени елементів;

– забезпечення можливостей раціонального проектування електронних генераторів, які збуджують випромінювачі кругових антен з екраном, завдяки створенню раніше відсутніх методики розрахунку електричних полів п'єзокерамічних випромінювачів у складі таких антен.

Результати дисертаційної роботи впровадженні в державному підприємстві «Київський науково-дослідний інститут гідроприладів», що підтверджується актом впровадження.

## **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Акустичні антени / В. С. Дідковський, С. М. Порошин, О. В. Коржик [та ін.]. – К. : НТУУ «КПІ», 2014 р. – 244 с.
2. Акустика. Справочник / под ред. М. А. Сапожкова. – М.: Радио и связь, 1989. – 336 с.
3. Аронов Б. С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики / Б. С. Аронов. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 272 с.

4. Аронов Б. С. О расчете пьезокерамических приемников первого порядка / Б. С. Аронов // Акустический журнал. – 1988. – Т.24. №5 – С. 804-810.
5. Aronov B. Analysis of the piezoelectric properties of tangentially polarized, stripe-electroded cylinders / B. Aronov, C. Bachand, D. A. Brown // J. Acoust. Soc. Amer. – 2011 – Vol.129 – №1 – P. 2960-2967.
6. Aronov B. Analysis of unidirectional broadband piezoelectric spherical shell transducers for underwater acoustics / B. Aronov, D. A. Brown, Xiang Yan // J. Acoust. Soc. Amer. – 2012 – Vol.131 – №3 – P. 2079-2090.
7. Aronov B. Coupled vibration analysis of the thin-walled cylindrical piezoelectric ceramic transducers / B. Aronov // J. Acoust. Soc. Amer. – 2009 – Vol.125 – №2 – P. 803-818.
8. Aronov B. Experimental investigation of coupled vibrations in piezoelectric cylindrical shells / B. Aronov, D. A. Brown, S. Regmi // J. Acoust. Soc. Amer. – 2006 – Vol.120 – №3 – P. 1374-1380.
9. Aronov B. Piezoelectric circular ring flexural transducers / B. Aronov // J. Acoust. Soc. Amer. – 2013 – Vol.134 – №2 – P. 1021-1030.
10. Бабаев А. Э. Нестационарные колебания тонкостенного цилиндрического пьезовибратора в жидкости при неосесимметричном электрическом возбуждении / А. Э. Бабаев, Л. М. Бут, В. Г. Савин // Прикладная механика. – 1990. – Т.26. – С. 59-67.
11. Babaev A. E. Influence of an oscillating circuit on the radiation of transient acoustic waves by an electroelastic cylinder // A. E. Babaev, A. A. Babaev, I. V. Yanchevskiy // J. Acoust. Soc. Amer. – 2010 – Vol.127 – №4 – P. 2282-2289.
12. Басовский В. Г. Излучение звука конечной решеткой из открытых пьезокерамических колец / В. Г. Басовский // Акустический вестник. – 1998. – Т.1. №2. – С. 3-20.
13. Бейтмен Г. Высшие трансцендентные функции. Т.2. Функции Бесселя, функции параболического цилиндра, ортогональные многочлены / Г. Бейтмен, А. Эрдейи [пер. с англ. Н. Я. Виленкина]. – М.: Наука, 1966. – 295 с.



14. Берлинкур Д. Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы и их применение в преобразователях / Д. Берлинкур, Д. Керран, Г. Жаффе // Физическая акустика в 7 т., М.: Мир, 1966. – Т.1. – Часть А – С. 204-326.
15. Борисейко В. А. Соотношения электроупругости для цилиндрических оболочек вращения / В. А. Борисейко, В. Т. Гринченко, А. Ф. Улитко // Прикладная механика. – 1976. – Т.12. №2 – С. 26-33.
16. Butler J. L. A tri-modal directional transducer / J. L. Butler, A. L. Butler, J. A. Rice // J. Acoust. Soc. Amer. – 2004 – Vol.115 – №2 – P. 658-665.
17. Ватсон Г. Н. Теория Бесселевых функций. Ч.1. / Г.Н. Ватсон [пер. со 2-го англ. Изд. В. С. Бермана]. – М.: Издательство иностранной литературы, 1949. – 798 с.
18. Визначення електричної напруги на навантаженні прийомного сферичного електропружного перетворювача, який заповнено акустичним середовищем (постановка і загальний розв'язок) / Д. Д. Новак, О. В. Коржик, О. М. Петрищев, Ю. В. Губинець // Системи обробки інформації. – 2014. – №7 – С. 49-56.
19. Вовк И. В. Звуковое поле бесконечного кругового цилиндрического преобразователя, частично покрытого слоем акустически мягкого материала / И. В. Вовк, В. Т. Гринченко, В. И. Маяцкий // Акустический журнал. – 1972 – Т.18, – №3 – С. 365-369.
20. Вовк И. В. Излучение звука цилиндром, охваченным незамкнутым кольцевым слоем / И. В. Вовк // Акустический журнал. – 1980 – Т.26, №3 – С. 364-370.
21. Вовк И. В. Излучение звука конечным набором соосных пьезокерамических оболочек / И. В. Вовк, В. Т. Гринченко // Акустический журнал. – 1991 – Т.37 – №2 – С. 259-269.
22. Вовк И. В. О расширении возможностей метода частичных областей применительно к задачам излучения и рассеяния волн / И. В. Вовк, В. Т. Гринченко // Акустический журнал. – 1989 – Т.35 – №1 – С. 29-36.

23. Вовк И. В. К вопросу о направленности цилиндрического излучателя, частично покрытого слоем экранирующего материала / И. В. Вовк, В. Т. Гринченко // Акустический журнал. – 1975. – Т.21. №2 – С. 294-296.
24. Габидулин Г. С. Антенные устройства гидроакустических средств и их элементы / Г. С. Габидулин, А. М. Тюрин, В. И. Нестеренко. – Л.: ВМА, 1982. – 364 с.
25. Глазанов В. Е. Экранирование гидроакустических антенн / В. Е. Глазанов. – Л.: Судостроение, 1986. – 148 с. (Б-ка инженера гидроакустика).
26. Гольденвейзер А. Л. Теория упругих тонких оболочек / А. Л. Гольденвейзер. – М.: Наука, 1976. – 512 с.
27. Гринченко В. Т. Волновые задачи акустики: монография / В. Т. Гринченко, И. В. Вовк, В. Т. Мацыпура. – К.: Интерсервис, 2013. – 572 с.
28. Гринченко В. Т. Теоретические основы акустики: учебное пособие / В. Т. Гринченко, В. С. Дидковский, В. Т. Мацыпура. – К.: ИЗМН, 1998. – 376 с.
29. Гринченко В. Т. Основы акустики (учебное пособие) / В. Т. Гринченко, И. В. Вовк, В. Т. Мацыпура – К. : Наукова думка, 2009. – 867 с.
30. Гринченко В. Т. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках / В. Т. Гринченко, И. В. Вовк. – К.: Наукова думка, 1986. – 240 с.
31. Гринченко В. Т. Звуковое поле экранированного кругового цилиндра / В. Т. Гринченко, С. А. Лунева // Акустический журнал. – 1980 – Т.26, – №3 – С. 462-466.
32. Гузь А. Н. Гидроупругость систем оболочек / А. Н. Гузь, В. Д. Кубенко, А. Э. Бабаев. – К.: Высшая школа, 1984. – 206 с.
33. Гусак З. Т. Физические поля гидроакустической антенны, состоящей из уголкового рупора и пьезокерамического излучателя с окружной поляризацией / З. Т. Гусак, А. Г. Лейко // Электроника и связь. – 2014. – Т.19. №1 – С. 102-108.
34. Гусак З. Т. Поле излучения уголковой рупорной антенны с пьезокерамическим преобразователем с радиальной поляризацией / З. Т. Гусак, А. Г. Лейко // Электроника и связь. – 2014. – Т.19. №2 – С. 75-81.

35. Гусак З. Т. О частотных характеристиках электрических полей цилиндрической пьезокерамической антенны с экраном в виде незамкнутого кольцевого слоя / З. Т. Гусак, А. Г. Лейко // Журнал нано- та електронної фізики. – 2016. – Т.8. №1, 01029 – с. 1-6.
36. Гусак. З. Т. Свойства механических полей экранированных гидроакустических излучателей компенсированной конструкции в зависимости от параметров экрана / З. Т. Гусак // Сб. тр. акуст. симпоз. КОНСОНАНС-2015. – 2015. – С. 72-77.
37. Дідковський В. С. Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання). Навчальний посібник / В. С. Дідковський, О. Г. Лейко, В. Г. Савін. – Кіровоград : «Імекс-ЛТД», 2006. – 448 с.
38. Дідковський В. С. Особливості конструювання електроакустичних антен для рідинних акустичних технологій / В. С. Дідковський, О. Г. Лейко, І. В. Денисенко, І. В. Кандрачук // Електроніка та зв'язок. – 2011. – №2 – С. 140-145.
39. Доннел Л. Г. Балки, пластины и оболочки / Л. Г. Доннел [пер. с англ. под ред. Э.И. Григолюка.]. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. — 568 с.
40. Ebenezer D. D. Piezoelectric thin shell theoretical model and eigenfunction analysis of radially polarized ceramic cylinders / D. D. Ebenezer, P. Abraham // J. Acoust. Soc. Amer. – 1999 – Vol.105 – №1 – P. 154-163.
41. Ebenezer D. D. New methods to characterize radially polarized piezoelectric ceramic cylindrical shells of finite length / D. D. Ebenezer, A. J. Sujatha // J. Acoust. Soc. Amer. – 1997 – Vol.102 – №3 – P. 1540-1548.
42. Евтютов А. П. Инженерные расчеты в гидроакустике (2-е изд., перераб. и доп.) / А. П. Евтютов, В. Б. Митько. – Л.: Судостроение, 1988. – 288 с. (Б-ка инженера-гидроакустика).
43. Иванов Е. А. Дифракция электромагнитных волн на двух телах / Е. А. Иванов. – Минск : Наука и техника, 1968. – 584 с.

44. Иофе В. К. Электроакустика / В. К. Иофе. – М.: Связьиздат, 1954. – 184 с.
45. Исакович М. А. Общая акустика / М. А. Исакович. – М.: Наука, 1973. – 496 с.
46. Канторович Л. В. Приближенные методы высшего анализа / Л. В. Канторович, В. И. Крылов. – Л.: Физматлит, 1962. – 708 с.
47. Клей К. Акустическая океанография: Пер. с англ. / Под ред. Ю. Ю. Житковского. – М.: Мир, 1980. – 582 с.
48. Клещеев А. А. Основы гидроакустики / А. А. Клещеев, И. И. Клюкин. – Л.: Судостроение, 1987. – 224 с.
49. Климов А. Е. Дифракция звуковых волн на системе цилиндров, расположенных в незамкнутых кольцевых слоях / А. Е. Климов, А. Г. Лейко // Акустический журнал. – 1979. – Т.25, №5. – С. 717-724.
50. Климов А. Е. Дифракция звуковых волн на резонансном цилиндрическом преобразователе, частично покрытым звукоотражающим слоем конечной толщины / А. Е. Климов, А. Г. Лейко // Материалы IX Всесоюзной Акустической конференции. Сб. докладов, М.: АКИН, 1977, секция 2. – С. 33-39.
51. Клюкин И. И. Звук и море / И. И. Клюкин. – Л.: Судостроение, 1974. – 240 с.
52. Колесников А. Е. Акустические измерения / А. Е. Колесников. – Л.: Судостроение, 1983. – 256 с.
53. Конструювання електроакустичних приладів і систем для мультимедійних акустичних технологій. Навчальний посібник / В. С. Дідковський, С. М. Порошин, О. Г. Лейко [та ін.]. – К. : НТУУ "КПІ", 2013. – 390 с.
54. Коржик А. В. Амплитудно-частотные характеристики некоторых форм колебаний пьезокерамических цилиндрических приемников звука при различных видах электродирования в условиях связанности / А. В. Коржик // Акустичний вісник. – 2009 – Т. 12, – №3 – С. 33-40.
55. Коржик А. В. Гидроакустические устройства на основе многомодовых пьезокерамических преобразователей: дис. доктора техн. наук : 05.09.08 / Алексей Владимирович Коржик. – К. 2011. – 385 с.

56. Коржик А. В. Фазо-частотные характеристики некоторых форм колебаний пьезокерамических цилиндрических приемников звука при различных видах электродирования в условиях связанности / А. В. Коржик // Акустичний вісник. – 2009 – Т. 12, – №4 – С. 29-33.
57. Коржик А. В. Особенности импедансных характеристик цилиндрического излучателя нулевого порядка, размещенного в замкнутом кольцевом слое / А. В. Коржик // Электроника и связь. – 2013 – №3. – С. 49-55.
58. Коржик А. В. Исследование электромеханических характеристик излучающего цилиндрического пьезокерамического преобразователя с полностью электродированной поверхностью, расположенного в замкнутом кольцевом слое / А. В. Коржик, Т. С. Куроедова, Н. Ю. Филиппова // Электроника и связь. – 2013 – №1 – С. 102-109.
59. Коржик О. В. До визначення граничних умов в постановках задач прийому звуку сферичним електропружним перетворювачем з різними електродами / О. В. Коржик // Электроника и связь. – 2013. – №2 – С. 97-103.
60. Коржик А. В. Электромеханические характеристики приемного цилиндрического преобразователя размещенного в кольцевом слое / А. В. Коржик, В. П. Овсяник, Е. В. Попсуй, Н. Ю. Филиппова // Электроника и связь. – 2013 – №2 – С. 109-114.
61. Коржик А. В. Расчет частотной характеристики сферического монолитного пьезокерамического гидрофона / А. В. Коржик, О. Н. Петрищев // Электроника и связь. – 2014. – №3 – С. 73-87.
62. Коржик О. В. Випромінення звуку циліндричним електропружним джерелом нульового порядку, яке розміщено в замкненому пружному шарі / О. В. Коржик // Електроніка та зв'язок. – 2012. – №5 – С. 30-35.
63. Коржик А. В. Постановка и решение задачи о приеме звука цилиндрическим электроупругим преобразователем с полностью электродированной поверхностью, размещенным в замкнутом волновом слое / А. В. Коржик, Н. Ю. Филиппова // Электроника и связь. – 2012. – №1 – С. 18-24.

64. Корякин Ю. А. Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы / Ю. А. Корякин, С. А. Смирнов, Г. В. Яковлев. – СПб.: Наука, 2004. – 410 с.
65. Кубенко В. Д. Нестационарное взаимодействие элементов конструкции со средой / В. Д. Кубенко. – К.: Наукова думка, 1979. – 184 с.
66. Кузнецов В. П. Акустические океанологические исследования и экспедиции / В. П. Кузнецов, Б. Г. Мордвинов, В. И. Тимошенко. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2002. – 544 с.
67. Лейко А. Г. Акустические свойства цилиндрической пьезокерамической гидроакустической антенны с плоским экраном в диаметральной плоскости / А. Г. Лейко, З. Т. Гусак, И. В. Кандрачук, М. А. Мельниченко // Электроника и связь. – 2015. – Т.20. №2 – С. 71-78.
68. Лейко А. Г. Механические поля цилиндрической гидроакустической антенны с плоским экраном в диаметральной плоскости / А. Г. Лейко, З. Т. Гусак // Электроника и связь. – 2015. – Т.20. №3 – С. 87-93.
69. Лейко А. Г. Подводные акустическая аппаратура и устройства. Т.1. Подводные акустические антенны / А. Г. Лейко, Ю. Е. Шамарин, В. П. Ткаченко. – К.: Аванпостприм, 2000. – 320 с.
70. Лейко А. Г. Звуковые поля пьезокерамических излучателей с различным пьезоэффектом / А. Г. Лейко, А. И. Нижник, Я. И. Старовойт // Электроника и связь. – 2013 – №5 – С. 50-55.
71. Лейко А. Г. Акустические свойства цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкции с продольным и поперечным пьезоэффектами / А. Г. Лейко, А. И. Нижник, Я. И. Старовойт // Электроника и связь. – 2013 – №6 – С. 62-73.
72. Лейко А. Г. Звуковое поле бесконечной круговой цилиндрической решетки с зазорами / А. Г. Лейко // Акустический журнал. – 1978. – Т.24, №6. – С. 936-939.
73. Ляв А. Математическая теория упругости / А. Ляв, М. : 1935. – 674 с.

74. Мезон У. П. Физическая акустика. Т.1. Методы и приборы ультразвуковых исследований / У. П. Мезон. – М. : Мир, 1966. – 589 с.
75. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т.5. Электроупругость / В. Т. Гринченко, А. Ф. Улитко, Н. А. Шульга ; Отв. ред. А. Н. Гузь; АН УССР. Ин-т механики. – К. : Наукова думка, 1989. – 280 с.
76. Modal analysis of the electromechanical conversion in piezoelectric ceramic spherical shells / B. Aronov, D. A. Brown, Xiang Yan, C. L. Bechand // J. Acoust. Soc. Amer. – 2011 – Vol.130 – №2 – P. 753-763.
77. Novikov B. K. Nonlinear underwater acoustics / B. K. Novikov, V. I. Rudenko, V. I. Timoshenko. – New York: AIP-Press, 1987. – 262 p.
78. Oishi T. Broadband multimode baffled piezoelectric cylindrical shell transducers / T. Oishi, B. Aronov, D. A. Brown // J. Acoust. Soc. Amer. – 2007 – Vol.121 – №6 – P. 3465-3471.
79. ОСТ5.8361-86. Аппаратура гидроакустическая. Антенны и преобразователи. Методы измерения электроакустических параметров в измерительных бассейнах. – 1986. – 168 с.
80. Патент України №100428 МПК (2006) G01S 7/52. Активно-пасивна система «Гідроакустична станція – надводний корабель» / Д. А. Дерепя, О. Г. Лейко, І. М. Фалєєв, О. І. Старовойт, О. І. Нижник, З. Т. Гусак. – № 201500944 ; заявл. 06.02.2015 ; опубл. 27.07.2015, бюл. № 14.
81. Патент України №99634 МПК (2006) G01S 7/52. Направлений циліндричний гідроакустичний перетворювач / Д. А. Дерепя, О. Г. Лейко, А. О. Куцак, А. М. Кацан, О. С. Ісаєнко, О. М. Коньок, О. О. Кочарян, В. В. Джаназян, О. І. Старовойт, О. І. Нижник, З. Т. Гусак. – № 201500697 ; заявл. 28.01.2015 ; опубл. 10.06.2015, бюл. № 11.
82. Патент України №99064 МПК (2006) G01S 7/52. Циліндричний гідроакустичний перетворювач / Д. А. Дерепя, О. Г. Лейко, А. В. Косяковський, О. О. Расстригін, С. М. Розгонаєв, І. В. Аверічев, Ю. Я. Меленко, О. І. Старовойт, О. І. Нижник, З. Т. Гусак. – № 201500253 ; заявл. 14.01.2015 ; опубл. 12.05.2015, бюл. № 9.

83. Патент Украины №6210 МПК (2006) G01R 29/00. Трехдиапазонный способ определения физико-механических констант пьезокерамических материалов / В. С. Дидковский, О. Н. Петрищев, А. Н. Шаблатович. – № 20041109024; заявл. 04.11.2004; опубл. 15.04.2005, бюл. № 4.
84. Pathak A. G. Acoustic harmonic radiation from fluid-loaded infinite elastic plates used elasticity theory / A. G. Pathak, P. R. Stepanishen // J. Acoust. Soc. Amer. – 1993 – Vol.94 – №1 – P. 1700-1709.
85. Подводная электроакустическая аппаратура и устройства. Т.2. Технология акустических антенн. Методы изготовления с применением электрофизических приемов обработки / Ю. Е. Шамарин, А. Г. Лейко, А. Ю. Шамарин, В. П. Ткаченко. – К.: Аванпостприм, 2001. – 256 с.
86. Петрищев О. Н. Гармонические колебания пьезокерамических элементов. Часть 1. Гармонические колебания пьезокерамических элементов в вакууме и метод резонанса – антирезонанса / О. Н. Петрищев. – К.: «АВЕРС», 2012. – 299 с.
87. Петрищев О. Н. Осесимметричные колебания цилиндрической пьезокерамической оболочки конечной высоты / О. Н. Петрищев, А. В. Коржик, Н. Ю. Филиппова // Электроника и связь. – 2011. – №6 – С. 33-39.
88. Подводные электроакустические преобразователи. Справочник / [В. В. Богородский, Л. А. Зубарев, Е. А. Коренин, В. И. Якушев] – Л.: Судостроение, 1983. – 248 с.
89. Плєскач М. Г. Випромінєння звуку циліндричним п'єзокерамічним випромінювачем, розміщеним в шарі звукопрозорого матеріалу / М. Г. Плєскач, О. Г. Лейко // Електроніка та зв'язок. – 2010. – Т.57. №4 – С. 175-179.
90. Пьезоэлектрические трансформаторы и датчики / В. М. Шарапов, И. Г. Минаев, Ж. В. Сотула, К. В. Базило, Л. Г. Куницкая. – Черкассы: Вертикаль, 2010. – 278 с.



91. Радиальные колебания цилиндрической пьезокерамической оболочки / В. С. Дидковский, А. Е. Климов, А. Г. Лейко, О. Н. Петрищев // Электроника и связь. – 2009 – №6 – С. 31-40.
92. Radlinski R. P. Analysis of Scattering From Large Planar Gratings of Compilant Cylindrical Shells / R. P. Radlinski, G. A. Brigham, J. J. Libucha // J. Acoust. Soc. Amer. – 1977 – Vol.61 – №1 – P. 48-59.
93. Radlinski R. P. Radiations Patterns and Radiations Impedances of a Pulsating Cylinder Surrounded by Circular Cage of Parallel Cylindrical Rods / R. P. Radlinski, T. I. Meyers // J. Acoust. Soc. Amer. – 1974 – Vol.56 – №3 – P. 842-848.
94. Ржевекин С. Н. Курс лекций по теории звука / С. Н. Ржевекин. – М.: Изд. МГУ, 1960. – 336 с.
95. Рего Г. К. Метрологическая обработка результатов технических измерений / Г. К. Рего. – К.: Техника, 1987. –126 с.
96. Rogers P. H. Mathematical model for a free-flooded piezoelectric cylinder transducer / P. H. Rogers // J. Acoust. Soc. Amer. – 1986 – Vol.80 – №1 – P. 13-18.
97. Савин В. Г. Уравнения движения тонкостенных цилиндрических пьезокерамических преобразователей с окружной поляризацией / В. Г. Савин, Ю. А. Дидусенко // Сб. тр. акуст. симпоз. КОНСОНАНС-2011. – К. : ИГМ НАНУ, 2011. – С. 230–235.
98. Савин В.Г. Прямая и обратная задачи излучения акустических импульсов цилиндрическим пьезокерамическим преобразователем / В. Г. Савин, Ж. В. Сотула, Н. И. Штефан // Механіка гідроскопічних систем. – 2012 – №25 – С. 94-102.
99. Савин В. Г. Преобразование акустических импульсов в электрические цилиндрической пьезокерамической оболочкой / В. Г. Савин // Акустический журнал. – 1992 – Т.38 – №1 – С. 144-149.
100. Савин В. Г. Уравнения колебаний пьезокерамических сферических и цилиндрических оболочек / В. Г. Савин, И. О. Моргун // Інформаційні

системы, механіка та керування: науково-технічний збірник. – 2010. – №5. – С. 85–96.

101. Свердлин Г. М. Гидроакустические преобразователи и антенны / Г. М. Свердлин. – Л.: Судостроение, 1980. – 228 с.
102. Свердлин Г. М. Прикладная гидроакустика: Учеб. Пособие (2-е изд., перераб. и доп.) / Г. М. Свердлин. – Л.: Судостроение, 1990. – 320 с.
103. Сенченко И. В. Закономерности колебаний пьезокерамических оболочек с учетом взаимодействия с окружающей средой: дис. канд. техн. наук: 01.02.04 / Иван Васильевич Сенченко. – К. 1986. – 129 с.
104. Сенченко И. В. Рассеяние звука пьезокерамической цилиндрической оболочкой вблизи жесткой поверхности / И. В. Сенченко // Прикладная механика. – 1984. – Т.20. №7 – С. 111-114.
105. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы / Е. Скучик. – М. : Мир, 1971. – 560 с.
106. Смарышев М. Д. Направленность гидроакустических антенн / М. Д. Смарышев. – Л.: Судостроение, 1973. – 278 с.
107. Смарышев М. Д. Справочник по расчету направленных свойств гидроакустических антенн / М. Д. Смарышев, Ю. Ю. Добровольский. – Л.: Судостроение, 1984. – 304 с.
108. Сокол Г. И. Анализ проблем направленности акустического излучения на инфразвуковых частотах / Г. И. Сокол // Сб. тр. акуст. симпоз. КОНСОНАНС-2009. – 2009. – С. 304-309.
109. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т.1 / Под ред. Ю. В. Корицкого и др. – 3-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 368 с.
110. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т.2 / Под ред. Ю. В. Корицкого и др. – 3-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 368 с.

111. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т.3 / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – 3-е изд., перераб. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.
112. Стретт Дж. В. (Лорд Рэлей). Теория звука. Т.1 / Дж. В. Стретт. – М. : Гостехиздат, 1955. – 503 с.
113. Стретт Дж. В. (Лорд Рэлей). Теория звука. Т.2 / Дж. В. Стретт. – М. : Гостехиздат, 1955. – 475 с.
114. Харкевич А. А. Теория преобразователей / А. А. Харкевич. – М. : Госэнергоиздат, 1948. – 191 с.
115. Шарапов В. М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шарапова. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.
116. Шейнман И. Л. Звукопрозрачность обтекателей гидроакустических антенн / И. Л. Шейнман, Л. Е. Шейнман, Е. А. Шендеров. – СПб. : Технолит, 2008. – 322 с.
117. Шендеров Е. Л. Волновые задачи гидроакустики / Е. Л. Шендеров. – Л. : Судостроение, 1972. – 352 с.
118. Шендеров Е. Л. Излучение и рассеяние звука / Е. Л. Шендеров. – Л. : Судостроение, 1989. – 304 с. (Б-ка инженера-гидроакустика)
119. Sherman C. H. Transducers and Arrays for Underwater Sound / C. H. Sherman, J. L. Butler. – New York : Springer, 2007. – 610 p.
120. Тамм И. Е. Основы теории электричества: Учеб. пособие для вузов (10-е изд., испр.) / И. Е. Тамм. – М. : Наука, 1989. – 504 с.
121. Терминологический словарь – справочник по гидроакустике / Р. Х. Бальян, Э. В. Батаногов, А. В. Богородский и др. – Л. : Судостроение, 1989. – 368 с.
122. Филиппова Н. Ю. Закономерности формирования акустических полей приемного цилиндрического пьезокерамического преобразователя, расположенного в кольцевом слое / Н. Ю. Филиппова, Е. В. Попсуй, А. В. Коржик // Электроника и связь. – 2012. – №6 – С. 42-48.
123. Филиппова Н. Ю. Постановка и решение задачи о приеме звука экранированным цилиндрическим электроупругим преобразователем с

разрезными электродами / Н. Ю. Филиппова // Системы обработки інформації. – 2013. – №6 – С. 146-152.

124. Филиппова Н. Ю. Постановка и решение задачи излучения звука многомодовым пьезоэлектрическим преобразователем, размещенном в замкнутом кольцевом слое / Н. Ю. Филиппова // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2014. – №1 – С. 74-82.
125. Филиппова Н. Ю. Прием и излучение звука цилиндрическим электроупругим преобразователем с согласующим слоем: дис.... канд. техн. наук : 05.09.08 / Наталья Юрьевна Филиппова. – К., 2015. – 157 с.

Державний концерн  
УКРОБОРОНПРОМ  
Державне підприємство  
«Київський науково-дослідний  
Інститут  
ГІДРОПРИЛАДІВ»



The State Concern  
UKROBORONPROM  
State Enterprise  
«Kyiv Scientific Research  
Institute  
Of HYDRODEVICES»

Україна, 03035, Київ, вул. Сурікова, 3  
Тел. (380-44) 239-90-18,  
факс (380-44) 239-90-17  
e-mail: [office@hydrodevices.kiev.ua](mailto:office@hydrodevices.kiev.ua)  
[ryba@ukrpack.net](mailto:ryba@ukrpack.net)  
WWW.HYDRODEVICES.KIEV.UA

3, Surikova str., Kyiv, 03035, Ukraine  
Tel.: (380-44) 239-90-18,  
fax: (380-44) 239-90-17  
e-mail: [office@hydrodevices.kiev.ua](mailto:office@hydrodevices.kiev.ua)  
[ryba@ukrpack.net](mailto:ryba@ukrpack.net)  
WWW.HYDRODEVICES.KIEV.UA

№ \_\_\_\_\_  
на № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Заступник директора  
з наукової роботи  
ДП «КНДІ Гідропріладів»  
Ковальчук К.В.  
« \_\_\_\_\_ » 2018 р.

#### Акт впровадження

результатів дисертаційної роботи Старовойта Ярослава Івановича  
«Теоретичні основи проектування «рухових антенних решіток,  
утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів»  
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю  
05.09.08. – Прикладна акустика та звукотехніка.

Результати досліджень, викладені в кандидатській дисертації Старовойта  
Ярослава Івановича «Випромінювання гідроакустичних сигналів планарними  
антенними решітками з екраном, утвореними із циліндричних п'єзокерамічних  
перетворювачів», використані:

- при виконанні розрахунків звукових полів циліндричних перетворювачів  
по контракту №15DMAC/YZD589UA від 28.08.2015 р. з КНР;

Головний конструктор контракту  
№15DMAC/YZD589UA

В.С. Коцюба